THESE présentée

pour l'obtention

du

DIPLOME DE DOCTEUR DE 3e CYCLE

à

L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE

- Paris 6 -

spécialité : Traitement Algorithmique de l'information

Mention : Informatique

Par Mademoiselle Martine Fortin

Ingénieur E.S.I.E.E.

Sujet de la thèse : RECALAGE D'IMAGES MULTI-SOURCES:

APPLICATION AUX IMAGES DE TELEDETECTION.

soutenue le 27 Septembre 1983 devant la commission composée de:

Monsieur J.C. Simon	Président
Monsieur G. Stamon	Examinateur
Monsieur R. Moreau	"
Monsieur R. Jeansoulin	"
Monsieur J.P. Crettez	"
Monsieur J.L. Wendel	"

UNIV.
KANSAS
LIBR.

THESE présentée

pour l'obtention

du

DIPLOME DE DOCTEUR DE 3e CYCLE

à

L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE

- Paris 6 -

spécialité : Traitement Algorithmique de l'information

Mention : Informatique

Par Mademoiselle Martine Fortin

Ingénieur E.S.I.E.E.

Sujet de la thèse : RECALAGE D'IMAGES MULTI-SOURCES:
APPLICATION AUX IMAGES DE TELEDETECTION.

soutenue le 27 Septembre 1983 devant la commission composée de:

Monsieur J.C. Simon	Président
Monsieur G. Stamon	Examinateur
Monsieur R. Moreau	"
Monsieur R. Jeansoulin	"
Monsieur J.P. Crettez	"
Monsieur J.L. Wendel	"

Je tiens tout d'abord à remercier le Professeur J.C. Simon de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.

Je suis très reconnaissante envers le Professeur G. Stamon pour ses conseils et ses encouragements tout au long de ce travail et pour avoir accepté d'être le rapporteur de ma thèse.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Moreau, directeur du Centre Scientifique IBM-France, de m'avoir permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions, et aujourd'hui de participer à ce jury.

Je remercie profondément R. Jeansoulin de m'avoir fait bénéficier de son expérience en télédétection et spécialement en recalage d'images.

Je sais gré au professeur P.L. Wendel et à J.P. Crettez d'avoir accepté de participer au jury de cette thèse.

Je remercie sincèrement W. Niblack, responsable de mon travail au Centre Scientifique, de son aide scientifique et technique.

Je tiens à citer également tous les membres du Centre Scientifique ainsi que les autres étudiants préparant des thèses au Centre pour leur gentillesse et leurs compétences.

Enfin je remercie de tout coeur tous mes amis et ma famille qui ont su m'encourager et m'aider au cours de ces deux années. J'ai une pensée toute particulière pour ceux qui ont accepté la tâche difficile de relire ma thèse.

RECALAGE D'IMAGES MULTI-SOURCES :

APPLICATION AUX IMAGES DE TELEDETECTION

PLAN GENERAL

	Page
Introduction générale	7 - 16
PREMIER CHAPITRE: Présentation générale de la télédétection	17 - 39
1. Introduction	18
2. Les capteurs	19 - 23
3. Distorsions géométriques et radiométriques	24 - 26
4. Les principales applications de la télédétection	27 - 31
5. L'importance du recalage en télédétection	31 - 33
6. Description générale des méthodes de recalage	34 - 38
SECOND CHAPITRE: Recherche hiérarchisée de points de contrôle	39 - 64
1. Mise en correspondance locale de premier niveau	42 - 46
a. Images issues d'un même capteur	42
b. Images issues de capteurs différents	43 - 46
2. Test de validité structurelle	46 - 50
a. Extraction de contours locaux	46 - 48
b. Filtrage adapté	48 - 49
c. Extraction de contours par dérivation après sur-échantillonnage fictif et lissage	50
3. Mise en correspondance locale de deuxième niveau: Recherche de la meilleure coïncidence locale	51 - 58
a. Algorithme SSDA (Sequential Similarity Detection Algorithm)	54 - 56
b. Mesure de ressemblance par cross-corrélation statistique	57 - 58

Page

1) Calcul direct 57

2) Transformée de Fourier 57

3) Recherche séquentielle 58

4) Corrélation d'images binaires 58

4. Test de validité statistique 59

5. Mise en correspondance locale de troisième niveau 60

a. Sur-échantillonnage local 60

b. Interpolation de la surface de corrélation 60

6. Prétraitement géométrique 61 - 64

TROISIEME CHAPITRE Modélisation: Estimation de la fonction de transfert géométrique 65 - 90

1. Modélisation globale 67 - 69

a. Par la méthode des moindres carrés 67 - 68

b. Par analyse structurelle de l'espace de modélisation 68 - 69

2. Etude de modélisations régionales des déformations sur les images multi-sources. 70 - 90

a. Modèlisation par sous-images 70 - 73

b. Modèles par régions 73 - 80

1) Plages de résidus constants 74

2) Modèle numérique de terrain 74

3) Triangulation de l'image par la méthode de Delaunay 74 - 80

a) Construction de la triangulation de Delaunay 75 - 76

b) Graphe représentant la structure géométrique de l'image 76 - 78

c) Remarque sur le ré-échantillonnage 78

Page

d) Discussion 78 - 80

c. Modèle élastique de déformation: modélisation optimale 81 - 90

1) Présentation du modèle 81 - 83

2) Conditions aux limites 84 - 85

3) Equations d'équilibre 85 - 87

4) Forces externes 88 - 89

5) Conclusion 89 - 90

QUATRIEME CHAPITRE Description de l'algorithme de recalage développé 91 - 136

1. Architecture matérielle 92 - 95

2. Organisation logicielle 96 - 98

3. Algorithme de recalage 99 - 136

a. module d'apprentissage: Constitution d'un fichier de points de contrôle 101- 109

b. Module d'estimation de la fonction de transfert géométrique: opérateur de reconnaissance 110- 120

c. Module d'identification globale et ré-échantillonnage 121- 136

CINQUIEME CHAPITRE Applications 137- 148

Conclusion 149- 152

Annexe: 153- 156

Algorithme des moindres carrés utilisé

Bibliographie 157- 164

INTRODUCTION GENERALE

Les images sont pour nous un moyen de communication extraordinaire. De nombreuses techniques ont été mises au point durant ces quinze dernières années pour les coder, comprimer l'information qu'elles contiennent, les transmettre et les analyser.

· L'homme a une faculté d'analyse visuelle considérable qui lui permet de reconnaître ce qu'il cherche sur une image indépendamment de la position et de l'orientation de cette forme dans l'image, même si une partie de cette forme est cachée ou déformée.

Les techniques de reconnaissance de formes numériques ne sont malheureusement pas aussi perspicaces; pour qu'un processus de reconnaissance de forme retrouve un objet dans une scène, il est nécéssaire que cet objet réponde relativement bien aux critères attendus par le processus. Un critère significatif en analyse et compréhension de scène est la forme de cet objet. Il est clair que l'aspect géométrique des formes rencontrées dans une image est très important. Pour comparer ou associer deux objets correspondants sur deux images différentes, il faut qu'ils soient observés dans la même géométrie: Ce sera les différentes faces d'une pièce mécanique, l'angle de vue d'une scène 3D, la projection sur un référentiel donné d'une image de télédétection (cartographie) ou d'une image médicale (tomographie).

Le traitement consistant à déformer un objet pour le rapporter à une géométrie de référence s'appelle le recalage.

L'opération de recalage est un prétraitement indispensable dans toutes les applications multi-conceptuelles dans lesquelles la mise en coïncidence de plusieurs images permet de prendre en compte une troisième dimension [2] , [10], [11] , [12], [23].

Il peut s'agir de la variable temps qui permet d'étudier l'évolution d'un phénomène physique (analyse multi-temporelle ou diachronique): c'est le cas du suivi d'une séquence d'images cardiaques ou celui de l'étude de l'évolution du désert au Sahel par télédétection.

Il peut s'agir d'une variable spectrale permettant d'analyser sur un même support les mesures issues d'instruments différents (analyse multispectrale): citons, par exemple, le cas des classifications multispectrales classiques en télédétection.

Le recalage est une mise en correspondance globale sur la scène étudiée (une image entière ou une sous-image dont les dimensions restent néanmoins non négligeables par rapport à l'image) de plusieurs informations provenant d'origines diverses: qu'il s'agisse de plusieurs images entre elles ou bien d'images et d'autres documents tels des cartes de la scène analysée en télédétection, ou bien de référence prototype tels des profils dans le cas vérification de pièces industrielles, le problème fondamental reste le même.

L'objet de cette thèse est la conception d'un système de recalage d'images multi-sources en télédétection.

Nous prendrons le cas de la mise en superposition de deux images: une image dite de référence qui sera dans la géométrie de référence de notre problème (ce peut être une image satellite ou aéroportée ou une carte numérisée) et l'image d'entrée de notre processus, cette image doit être déformée géométriquement de manière à être superposable à la première.

Nous allons formuler le problème dans ce qui suit comme un problème de reconnaissance des formes.

Examinons le synoptique général (figure 1 de la page 14):

Nous ne parlerons de forme qu'en tant qu'élément d'un espace structuré dont nous connaissons les propriétés intrinsèques. Cet espace est choisi en fonction des résultats attendus dans l'application considérée. Nous l'appellerons espace de représentation. Le synoptique décrit le passage de l'espace physique (ou espace de la réalité) à un espace de représentation et situe l'opérateur de recalage dans cette chaine.

Les deux capteurs symbolisent deux cas de figure différents:

- Il s'agit du même capteur à des dates différentes: c'est le cas de l'analyse multitemporelle.
- Il s'agit de deux capteurs différents en action au même instant ou non (Le cas idéal est effectivement celui où les prises de vue sont simultannées mais ce n'est pas toujours le

cas faute de disponibilité des données lors de l'application): c'est le cas de l'analyse multispectrale.

Les principales caractéristiques optiques des capteurs sont leurs bandes passantes (canaux spectraux disponibles), leur résolution au sol et leur angle de visée. Ces caractéristiques sont variables d'un capteur à un autre.

Les espaces de données situés juste derrière les capteurs ne sont pas, en général, exploitables car il n'existe pas de référentiel intrinsèque à ces espaces, autrement dit, ces espaces n'étant pas munis d'une structure algébrique, toute opération sur le signal est impossible.

Les transducteurs projèttent le signal de l'espace de données dans l'espace de représentation. Ils peuvent être du plus simple (normalisation) au plus compliqué (échantillonnage, quantification, numérisation, codage, filtrage, transformations orthogonales,...). Il devient alors possible d'effectuer différentes opérations sur les formes ainsi repérées; ces opérations étant internes ou externes pour la structure de l'espace de représentation.

Le recalage peut être considéré comme un exemple d'opérateur externe qui permet de passer d'une structure d'espace de représentation à une autre, par changement de base spatiale. Interessons nous maintenant de plus près à cet opérateur: voir figure 2 de la page 15. On peut le considérer à lui seul comme un opérateur de reconnaissance de formes:

Il procède en cinq étapes:

1. Evaluation d'un ensemble d'apprentissage formé d'un sous-ensemble de mesures décrivant les conditions d'enregistrement des images ou bien d'un sous-ensemble de points des deux images à traiter: La constitution de cet ensemble se fera alors par mise en correspondance locale des deux images par des méthodes de recherche de maximum de ressemblance locale .

2. Estimation de l'opérateur de reconnaissance: Il s'agit d' estimer sur l'espace d'apprentissage la fonction de transfert entre la géométrie de référence et celle de l'image d'entrée.

3. Une phase de tests en dehors de l'espace d'apprentissage permettra de mesurer la validité de notre modèle et donc ses limites sur l'image d'entrée considérée.

4. Identification: Si la phase de tests s'est avérée positive, il peut y avoir identification globale c'est à dire mise en correspondance globale de l'image d'entrée et de l'image de référence

5. Mesure de validité de l'opérateur: L'étape d'identification a permis de reconnaitre dans l'image d'entrée (espace de représentation B) toutes les formes de l'image de référence (espace de représentation A)et de les mettre en coïncidence dans l'espace de représentation C; la distance résiduelle entre l'image créée dans l'espace de représentation C et l'image de référence mesure la qualité de l'opérateur de recalage.

Pour clore cette introduction, nous nous proposons de préciser quelques termes employés tout au long de cette thèse:

Image d'entrée: image à recaler.

Image de sortie: image recalée.

Image de référence: document représenté dans la géométrie de référence.

Point de contrôle: point remarquable sur l'image d'entrée ayant son homologue sur l'image de référence.

Zone de contrôle: voisinage d'un point de contrôle.

"Distance" géométrique: nous employons cette notion de façon qualitative pour évaluer l'importance de la déformation relative entre deux images;
deux images Landsat MSS de la même région sont à une faible distance géométrique l'une de l'autre, deux images simulées Spot de la même région peuvent être à une grande distance géométrique l'une de l'autre, enfin une image Landsat MSS et une image SEASAT de la même région seront très distantes géométriquement.

Fréquence spatiale de la déformation: dernière harmonique significative de la décomposition en série de Fourier de la fonction des coordonnées spatiales de l'image approximant la déformation. Elle est définie pour la déformation horizontale et pour la déformation verticale. Si elle est grande par rapport aux dimensions de l'image, on dit que la déformation comporte de hautes fréquences spatiales, sinon elle ne comprend que de basses fréquences spatiales.

Modèle de déformation: modèle qui, étant donné un point de l'image de sortie (dans la géométrie de référence), le situe dans l'image d'entrée.

Recalage: il est considéré comme un opérateur de reconnaissance de forme agissant globalement sur l'image. Il procède en cinq étapes:

1) l'évaluation d'un ensemble d'apprentissage

2) l'estimation de l'opérateur de reconnaissance

3) une phase de test

4) l'identification

5) une mesure de validité de l'opérateur

Superposition de deux images: association arithmétique, logique, ou purement visuelle sur un même support des informations provenant de deux images.

Correction ou rectification: application d'un modèle de déformation sur une image, c'est une opération agissant sur les points de l'image.

Identification: mise en correspondance globale de l'image d'entrée et de l'image de référence.

Nous détaillerons dans cette thèse différentes méthodes utilisées au cours de ces cinq étapes, nous présenterons celle que nous avons developpée au Centre Scientifique IBM ainsi que les résultats que nous avons obtenus sur des images de télédétection provenant de différents capteurs (aéroportés et satellites); mais nous consacrons tout d'abord le premier chapitre à une présentation générale de la télédétection.

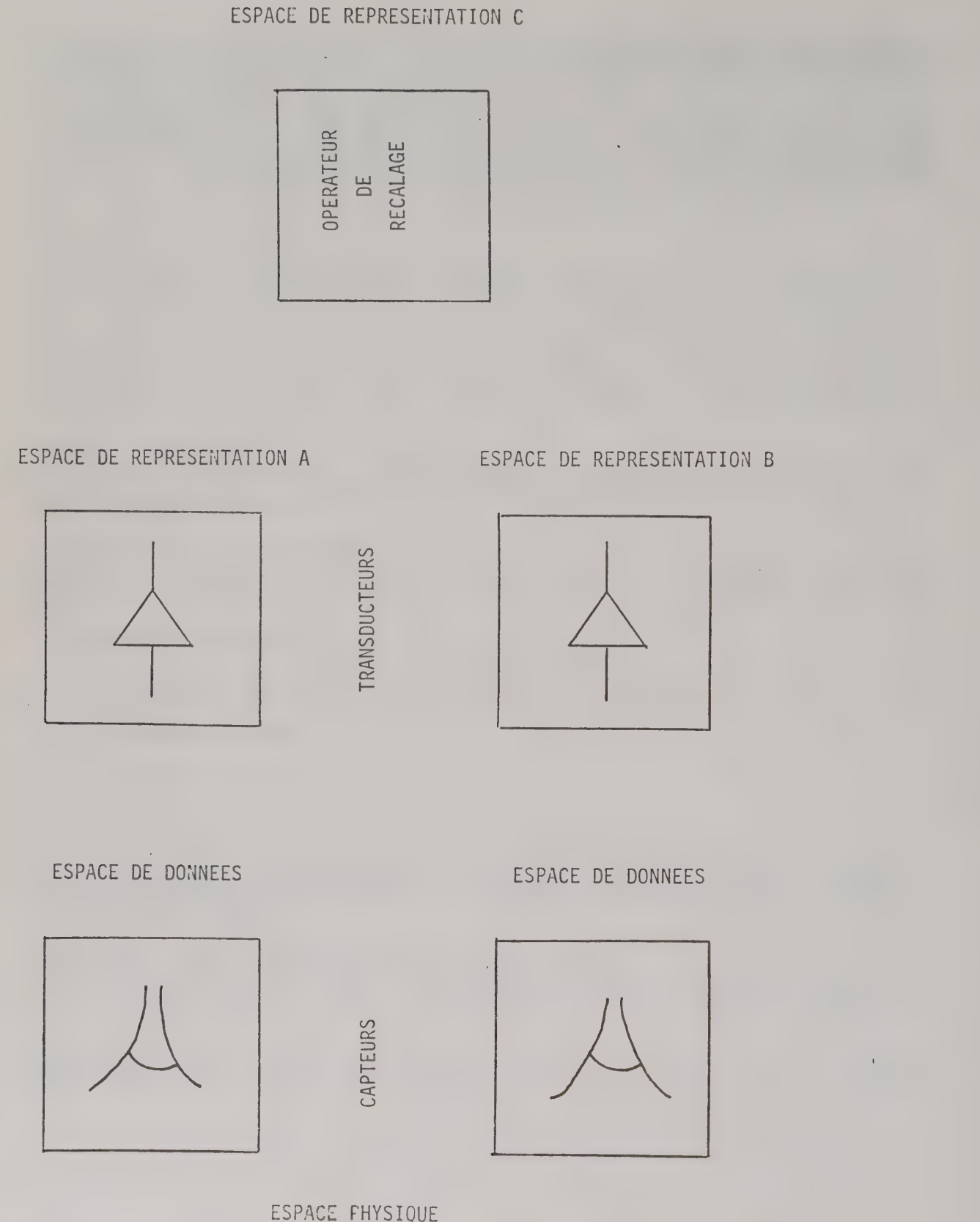


Figure 1. transfert de l'espace physique à un espace de représentation

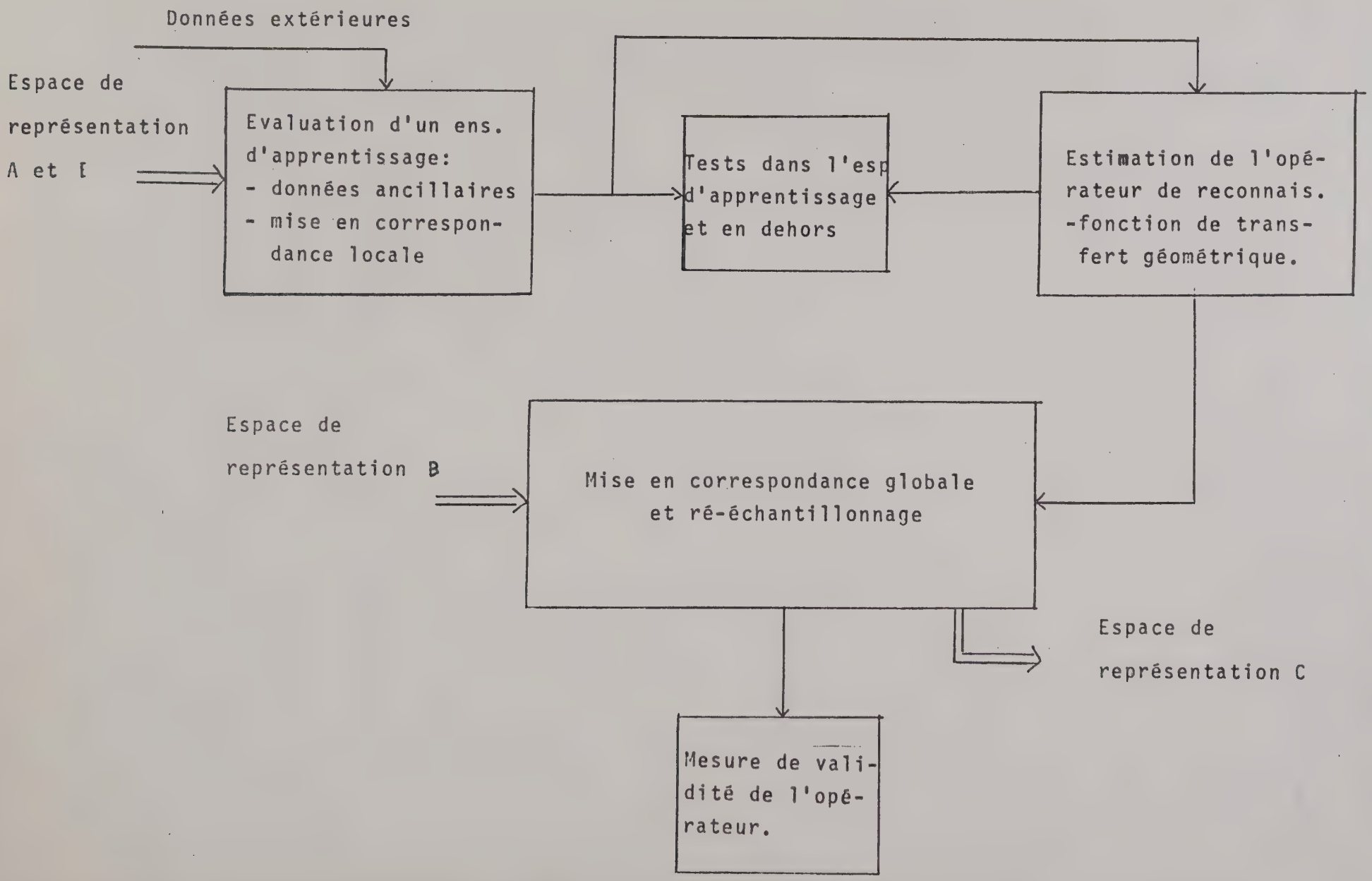


Figure 2. Synoptique de l'opérateur de recalage

PREMIER CHAPITRE

PRESENTATION GENERALE DE LA TELEDETECTION

1. INTRODUCTION

La télédétection fournit des images d'une même scène, possédant des caractéristiques spatiales et spectrales diverses. L'étude de ces images séparement ainsi que leur combinaison met en évidence des phénomènes qu'il serait difficile de discerner sur le terrain. Elle permet en outre la collection de données sur des régions d'accès difficile.

Elle apporte un aspect global, synthétique et structuré (de part la résolution même des images) nécéssaire à l'étude d'un phénomène naturel ou non sur une région. Ceci permet en effet au spécialiste de disposer d'informations dotées d'une structure hiérarchique essentielle à son interprétation des images, car elle lui permet d' extraire des paramètres à la fois globaux et locaux sur la région qu'il étudie.

La télédétection est aussi un moyen d'inventaire et de suivi temporel de phénomènes sur de vastes superficies.

De plus, le développement depuis quelques années de nombreux logiciels de traitement d'images fournit aux spécialistes une grande aide lors de leurs photo-interprétations.

Ce premier chapitre constitue une présentation générale de la télédétection. Nous definissons tout d'abord la cause des distorsions géométriques et radiométriques existant sur les images provenant de satellites, c'est pourquoi nous consacrons un paragraphe aux moyens d'enregistrement des images. Puis à travers les principales applications de la télédétection , nous démontrons que le fait de comparer et de combiner des images prises à des dates différentes ou par des capteurs différents, apporte une information très utile à l'interprétation de phénomènes terrestres naturels ou non; nous en déduisons l'importance de l'opération de recalage en télédétection et nous concluons ce chapitre en décrivant les différentes méthodes de recalage.

2. LES CAPTEURS

Les moyens d'enregistrement des données de télédétection diffèrent à la fois par l'engin porteur et par le capteur lui-même. Nous ne parlerons pas ici des capteurs aéroportés tel DAEDALUS qui fournissent des photographies aériennes permettant un gros travail de photo-interprétation, mais des capteurs portés par satellites.

On peut distinguer deux grandes familles de satellites de ressources terrestres:

-Les satellites à orbite héliosynchrone

-Les satellites à orbite géostationnaire

Les premiers sont à 900 Km d'altitude environ; ils sont sur une orbite circulaire quasi-polaire et passent toujours aux mêmes heures aux mêmes latitudes ce qui assure une couverture totale du globe et la reproductibilité des conditions d'éclairement mises à part les conditions météorologiques.

Les satellites géostationnaires décrivent une orbite équatoriale a 36000 Km d'altitude environ; avec une période de 24h, ils sont donc immobiles par rapport au sol. Trois satellites de ce type assurent la couverture totale du globe.

La figure 3 de la page 20 présente les différents passages du satellite LANDSAT. La figure 4 de la page 21 présente la couverture des satellites géostationnaires.

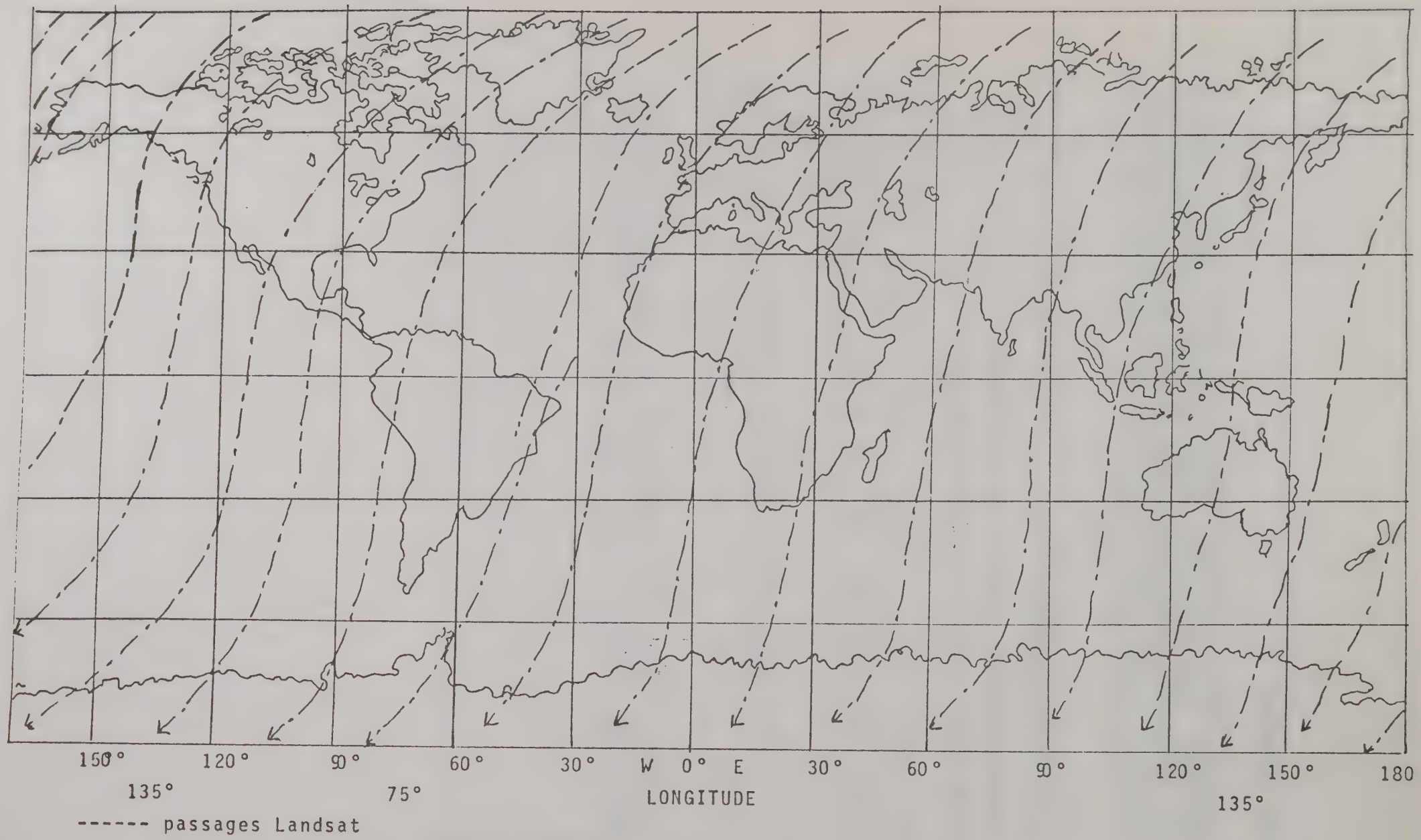


Figure 3. Trajectoire du satellite LANDSAT

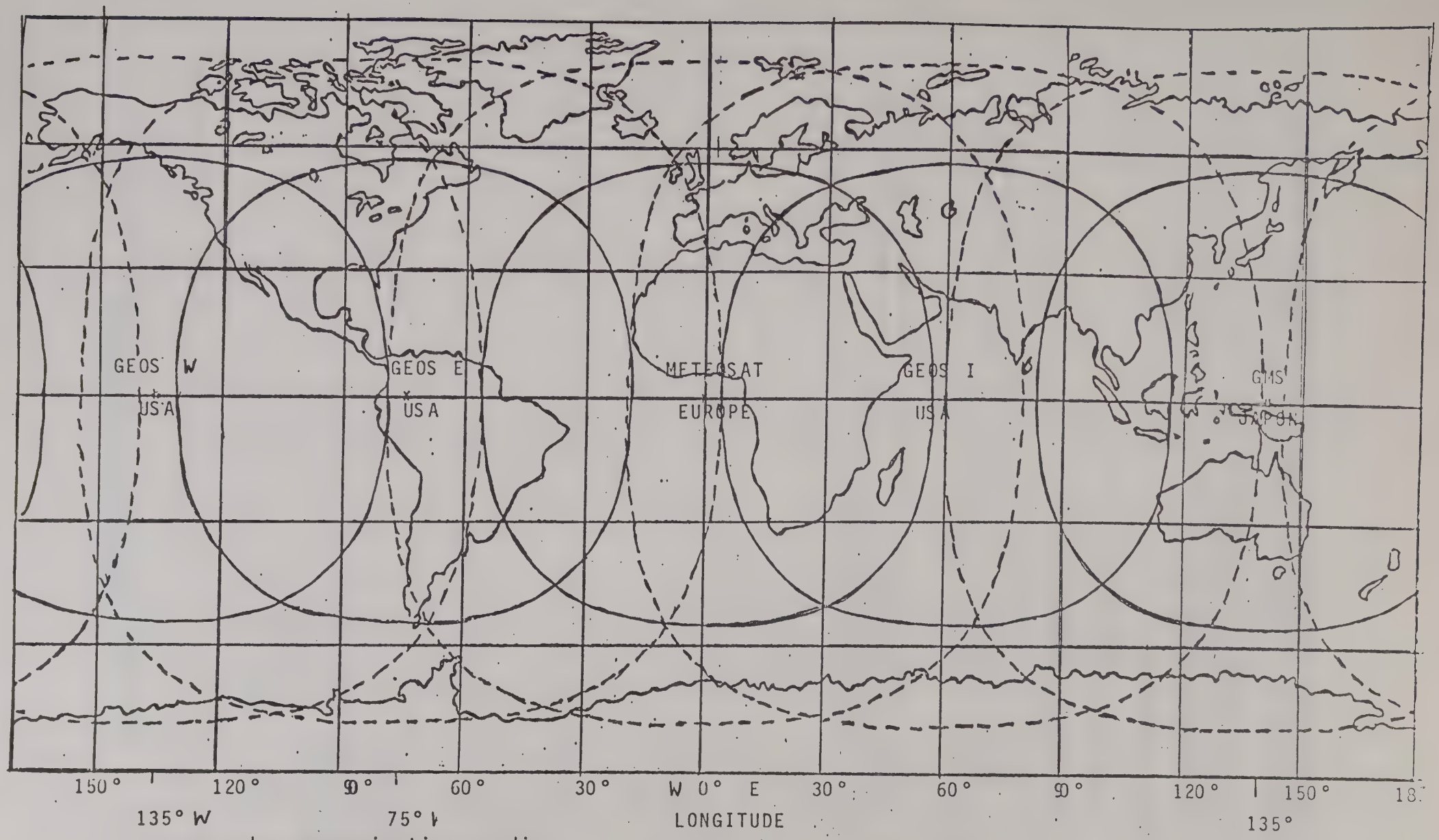


Figure 4. Couverture des satellites géostationnaires

Les capteurs diffèrent par leurs caractéristiques physiques, ce peut être:

- des appareils photographiques
- des caméras vidéo
- des radiomètres
- des capteurs électro-optiques
- des radars (capteurs actifs)

Ces capteurs présentent de grandes différences de conception: Les données résultantes diffèrent de part leur résolution spatiale et le domaine spectral couvert.

Un tableau récapitulatif présente les principaux satellites de ressources terrestres, les capteurs embarqués ainsi que leurs principaux champs d'applications.

SATELLITE	ALTITUDE ORBITRE PERIODICITE	CAPTEUR	DOMAINE SPECTRAL (microns)	RESOLUTION AU SOL
LANDSAT 1	900 Km orb. circ. qua.pol. 18j. hélios.	RBV MSS	0.475-0.575 0.580-0.680 0.690-0.830	38x38m
LANDSAT 2	" " " "	RBV MSS	0.5-0.6 0.6-0.7 0.7-0.8 0.8-1.1	57x79m
LANDSAT 3	" " " "	" "	panchro. "	" "
LANDSAT 4	" " " "	TM	0.45-0.52 0.52-0.60 0.63-0.69 0.76-0.90	30x30m
SPOT	822Km orb. circ. 26j helios.	HRV	0.50-0.59 0.61-0.68 0.79-0.89 0.51-0.73	20x20m " " 10x10m
HCMM	620Km	HCMR	0.51-1.1 10.5-12.5	500x500m 600x600m
SEASAT	800Km	RADAR incid. 23 d.	23.5cm	25x25m
SIR-A	260Km	RADAR incid. 50 d.	23.5cm	40x40m
SIR-B	225Km	RADAR incid. 15 à 60 d	23.5cm	17 à 58m
METEOSAT	35800Km geostat.	VDE VIS IRT	5.7-7.1 0.4-11 10-12.5	5000x5000m 2500x2500m 5000x5000m
NOAA 7	850Km orb. pol.	AVHRR VIS IRT	0.55-0.90 0.725-1.1 3.55-3.93 11.5-12.5	1000x1000m " " "

. Tableau récapitulatif des principaux satellites de ressources terrestres

3. DISTORTIONS GEOMETRIQUES ET RADIOMETRIQUES [12] , [84]

Les données acquises par imagerie spatiale sont affectées par des distorsions électroniques, mécaniques, géométriques et radiométriques qui diminuent la précision de l'information extraite. Il est important d'éliminer ces distorsions avant tout traitement.

On distingue deux types d'erreurs: les erreurs internes et les erreurs externes; les premières sont prévisibles, les secondes sont mesurables avec plus ou moins de précision.

Les erreurs internes sont dues au senseur, elles sont systématiques, stationnaires, c'est à dire constantes: elles peuvent donc être corrigées par calibration.

Les erreurs externes sont dues aux perturbations de la plateforme et aux caractéristiques de la scène, qui sont variables par nature. Ces erreurs peuvent être déterminées à partir d'une modélisation de l'attitude du satellite ou dans certains cas à partir de la donnée d'un modèle numérique de terrain ou bien à partir de points de contrôle ou amers pris sur les images.

Les principales sources d'erreurs internes sont liées aux senseurs eux-mêmes:

1) Distorsions mécaniques (senseur à balayage) le balayage du miroir ne s'effectue pas toujours à vitesse constante à cause de problèmes électromécaniques ce qui crée des distorsions géométriques dans le sens de la trace du satellite puisque les données sont saisies à intervalles de temps réguliers.

2) "Offset" radiométrique: une correction radiométrique systématique peut également être nécessaire pour calibrer l'ensemble des données radiométriques obtenues.

Les principales sources de perturbations externes sont les suivantes:

On notera par (P) les perturbations physiquement paramétrables et par (NP) celle qui ne le sont pas.

a) Les mouvements de plateforme

-Altitude (NP)

Les écarts du satellite par rapport à son altitude nominale entrainent des distorsions d'échelle sur les données. Cette distorsion suit le sens de balayage.

-Attitude (NP)

Le senseur doit être maintenu dans une position telle qu' un axe soit normal à la surface de la terre et l'autre parallèle au vecteur vitesse du satellite. Il est clair que si le senseur s'éloigne de cette position nominale, il s'en suit des distorsions géométriques.

-Biais de balayage (P)

Dans le cas de senseurs à balayage tel que MSS, le déplacement du satellite pendant le temps de balayage produit un biais sur les données dans le sens transversal à la trajectoire du satellite.

-Vitesse (NP)

Les changements de vitesse du satellite produisent des distorsions d'échelle le long de la trace du satellite.

b) Les effets de scène (P)

-Rotation de la terre (P)

Elle crée un décalage graduel vers l'Ouest de la bande de terrain balayée dans le cas de satellites à orbitre circulaire héliosynchrone. Il s'agit là encore de distorsion dans le sens du balayage.

-Projection sur carte (P)

[44] Il s'agit de passer du système de coordonnées en ligne et pel de l'image à un système de coordonnées géographiques compatibles avec les cartes de la région étudiée (projection plane du type UTM ou Lambert).

c) Effets dus à la scène et au senseur

-Effets panoramiques

Ces effets dus à la courbure de la terre sont d'autant plus importants que le satellite couvre une large bande de terrain autrement dit que la résolution du senseur est faible (METEO-SAT, HCMM ...)

-Effets de perspective

-Effets de relief

Ils sont d'autant plus apparents que le senseur est de haute définition et à un angle de visée éloigné de la normale (> 10 degrés), c'est le cas par exemple des senseurs RADAR actifs tels que SEASAT, SIR A ou SIR B.

-Effets atmosphériques

La radiance de la scène observée est dispersée et atténuée par l'atmosphère entre le senseur et le sol. Une correction radiométrique s'avère nécéssaire dans certaines applications où la connaissance des valeurs radiométriques réelles est requise (calcul d'albedo). Un modèle de transmission de l'atmosphère doit alors être employé.

4. LES PRINCIPALES APPLICATIONS DE LA TELEDETECTION

La télédétection, est une science encore peu structurée, mais offre un champ d'applications très vaste. Nous insisterons davantage sur les applications en météorologie et en géologie qui font l'objet de recherche au Centre Scientifique IBM.

a. Gestion des ressources naturelles

La télédétection spatiale est d'autant plus utile dans les domaines liés à l'environnement que les données images disponibles sont multiples et ont des caractéristiques spectrales et spatiales très diverses.

De nombreuses études ont été effectuées dans ce domaine; citons par exemple:

- Inventaire des forêts, du couvert végétal et des ressources en eau. [64] , [97], [68] [33] , [86], [80] .

- Evolution des effets de la sécheresse [48], [81] , [24].

- Surveillance des littoraux [18].

b. Aménagement du territoire et environnement

Le caractère synoptique des données de télédétection lui donne un rôle fondamental dans l'étude de l'environnement et de l'aménagement du territoire.

Jusqu'à présent, les cartes d'occupation des sols de zones agricoles ou urbaines étaient obtenues par photo-interprétation de photographies aériennes [36].

La télédétection spatiale est d'autant plus performante dans ce domaine que la définition des senseurs utilisés est bonne. Citons l'exemple de l'étude conjointe de l'institut d'aménagement urbain de la région de l'Ile de France et du Centre Scientifique IBM à l'issue de laquelle une carte du mode d'occupation des sols de la région parisienne sera mise à jour à partir de données de simulation SPOT (fournies par le G.D.T.A., Groupement pour le developpement de la télédétection aérospatiale) par des techniques de classification supervisée [73].

c. Cartographie par télédétection

La cartographie par télédétection concerne à la fois la mise à jour de cartes déjà existantes et l'élaboration de cartes sur des régions difficilement accessibles. On évalue à plus de 50% la couverture cartographique à établir sur l'ensemble du globe. Ceci sous-entend un traitement géométrique des images permettant une représentation dans une géométrie compatible avec celle des cartes usuelles [77] .

De plus, les nouvelles possibilités d'obtenir des paires stéréoscopiques sur les régions désirées (SPOT, SIR B) permettent des études altimétriques très précises.

Outre les techniques de classification usuelles (supervisées ou non), des traitements numériques appréciant l'hétérogénéité locale d'un paysage apportent une aide considérable au tracé de cartes. J.P. Rogala traite ce problème dans le cadre de la pédologie [83] .

d. Océanographie

La télédétection vient dans ce domaine palier un grand manque d'information, le milieu marin étant observé jusqu'à présent de façon très ponctuelle par l'intermédiaire de bateaux ou linéaire par surveillance aérienne.

Suivant la rapidité de l'évolution des phénomènes, on préfère utiliser des données provenant de satellites géostationnaires ou héliosynchrones:

Les satellites géostationnaires permettent en particulier la surveillance journalière de pollution marine [3], [32] , [87].

Les satellites héliosynchrones observent des phénomènes beaucoup plus lents tels que les courants marins ou des phénomènes cotiers tels que des phénomènes de sédimentation, d'envasement, de pollution, et permettent ainsi d'apporter des éléments de décision concernant l'équipement des littoraux.

e. Agriculture

Les satellites de ressources terrestres assurent une saisie de données qui permet un suivi des productions agricoles [26] , [47]. Il est clair que la qualité de la résolution au sol est très importante surtout lorsque le parcellaire agricole

est petit; Les satellites SPOT ou LANDSAT D apportent une grande amélioration à ce problème. G. Saint (équipe thématique de télédétection du CNES Toulouse) a obtenu de bons résultats sur la région du Laugerais en utilisant des images de simulation SPOT: la résolution au sol de SPOT est en effet bien adaptée à la taille du parcellaire agricole dans cette région [53], [57] .

Les images de télédétection spatiales fournissent également un moyen très objectif et précis du suivi de l'évolution forestière: Localisation, superficie, limites, coupes, incendies...

f. Météorologie et Climatologie [8] , [9]

En météorologie aucune prévision fiable ne peut être faite sans se référer à des images et plus généralement à des données météorologiques captées par des senseurs embarqués sur satellites. De nombreux satellites météorologiques se relayent, pour assurer la permanence de l'observation et permettre une modélisation plus efficace. Le bon fonctionnement des modèles numériques de prévision nécéssite des données initiales concernant une zone d'autant plus étendue que le délai de prévision est plus long. Ces mesures concernent: la pression, la température, le degré hygrométrique et la vitesse du vent à différentes altitudes.

Les satellites météorologiques ont l'avantage de couvrir une étendue continentale sur une seule image.

L'imagerie multispectrale dans le domaine visible et proche infra-rouge constitue également une bonne base de données pour l'analyse de phénomènes climatiques.

Carlson (1980) [19] a utilisé les données HCMM infra-rouges prises deux fois par jour pour étudier les phénomènes de distribution de la chaleur en surface, de flux d'évaporation,ainsi que les ressources humides du sol et son inertie thermique.

Soer (1980) [85] a utilisé des données infra-rouges provenant de scanners aéroportés pour étudier les températures en surface de certaines cultures en vue d'estimer le taux d'évapotranspiration et l'humidité du sol.

Kahle (1977) [60] a utilisé les 11 canaux multispectraux d'un scanner aéroporté pour mesurer l'albedo et la température au sol qui lui ont permis d'obtenir des images d'inertie ther-

mique de la surface terrestre en vue d'une cartographie géologique.

Rockwood (1977) [82] a utilisé SMS1, satellite géosynchrone pour déterminer l'albedo sur la région du Nord Ouest de l'Afrique.

Price (1982) [78] a utilisé les données HCMM infra-rouges pour estimer les tendances d'évaporation de surface et de capacité thermique.

Il est primordial pour ces applications de corriger les distorsions radiométriques dues aux perturbations atmosphériques et les distorsions géométriques de manière à reporter ces données sur des cartes géographiques.

g. Géologie

La photographie aérienne qui constituait depuis plusieurs dizaines d'années le document de travail du géologue a été remplacée dans de nombreuses applications par la donnée d'images satellites donnant une vue plus globale des régions étudiées. Alors que la télé-interprétation est de plus en plus fréquemment employée par des géologues, les méthodes, qu'ils utilisent, restent celles qu'ils employaient en photo-interprétation. Les méthodes numériques mises actuellement à leur disposition ne prennent pas assez en compte le grand nombre de critères de différentiation et d'interprétation des images. Il est sur que l'expérience du géologue et en particulier sa connaissance du terrain sont des facteurs difficilement intégrables dans un algorithme. Il s'agit d'un problème délicat d'extraction de paramètres de formes. De nombreuses études sont actuellement en cours dans ce domaine. Néanmoins les méthodes numériques de part leur rapidité et leur "objectivité" apportent une grande aide à l'interprétation:

La détection de failles ou de linéaments est facilitée par des méthodes d' amélioration de contraste et de détection de contour.

Une analyse fréquentielle locale de l'image permet également de regrouper en classes d'après leur orientation les différents linéaments: il s'agit de rosaces très informatrices pour le géologue.

Les structures circulaires sont plus apparentes sur les images spatiales qui de part leur faible résolution mettent en évidence l'aspect morphologique d'une région [92].

Bien que les structures analysées en géologie soient stables à notre d'echelle de temps, il n'est pas rare que les indices de ces phénomènes soient très évolutifs (indice de végétation, humidité, neige), c'est pourquoi des études diachroniques sont très souvent poursuivies.

Le satellite HCMM muni d'un capteur en proche infra-rouge thermique est utilisé à des fins géologiques: en effet, une image d'inertie thermique peut être générée à partir des images jour-nuit prises par ce capteur sur la même région. Cette nouvelle image est très représentative de l'aspect lithologique de la région.

Les méthodes de classification multispectrale utilisant des données multi-sources peuvent être très fructueuses pour les géologues mais elles sont délicates dans la mesure où les indices spectraux ne sont pas toujours des caractéristiques spécifiques des classes géologiques recherchées [59], [13], [88] , (cf études au Centre Scientifique IBM). [72] ,

5. IMPORTANCE DU RECALAGE EN TELEDETECTION

Nous avons vu que dans de nombreuses applications, les traitements effectués sur les données spatiales de télédétection consistaient en une association plus ou moins complexe de plusieurs types de données, que ce soient des données multi-temporelles provenant du même satellite, des données provenant de satellites différents ou bien l'association d'une carte ou même d'un modèle numérique de terrain à des données satellites. C'est cette association qui met en évidence les phénomènes recherchés. Les qualités métriques des différentes images sont particulièrement importantes pour l'exactitude de la localisation des phénomènes détectés.

L'association de ces différentes données nécéssite que leurs caractéristiques spatiales soient rigoureusement identiques, en d'autres termes, qu'elles soient représentées dans la même géométrie ou encore qu'elles soient parfaitement superposables; c'est le but du prétraitement géométrique de recalage. C'est donc le premier traitement à effectuer sur les images

avant de procéder à leur association: (figure 5 de la page 33)

C'est une opération très importante en télédétection, elle doit être très précise. Le recalage doit être fait avec une précision le proche possible de la taille du point élémentaire si ce n'est en dessous. Nous présentons dans le paragraphe suivant différentes méthodes de recalage

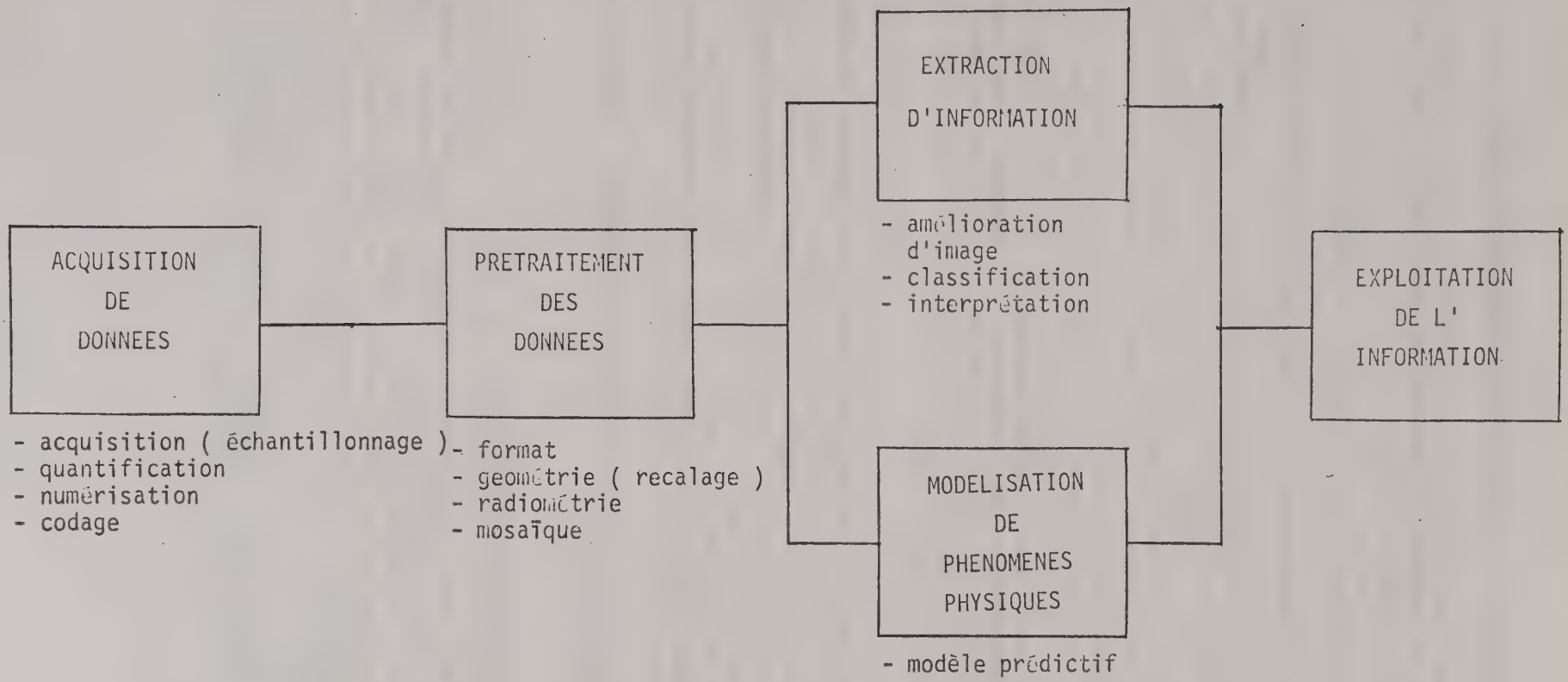


Figure 5. Chaine de traitement de télédétection

6. DESCRIPTION GENERALE DES METHODES DE RECALAGE

Reprenons le synoptique figure 1 de la page 14 et considérons la phase d'apprentissage: Cette étape dépend de trois ensembles de données:

-l'image d'entrée ESPACE DE REPRESENTATION A

-l'image de référence ESPACE DE REPRESENTATION B

-Un ensemble d'informations extérieures: les données ancillaires.

Cet ensemble représente un état des paramètres de vol du satellite (ou de l'avion): altitude, vitesse, attitude (roulis, tangage, lacet) .

En fonction de l'importance relative que l'on donne aux deux derniers ensembles de données; à savoir aux paramètres extraits de l'image de référence par rapport aux données ancillaires, on voit se dessiner différentes méthodes de recalage [62], [46], , [98].

-Les méthodes paramétriques: les données ancillaires sont ignorées

-Les méthodes physiques: les données provenant de l'image de référence sont ignorées

-Les méthodes mixtes: les deux types de données sont pris en compte

-Les méthodes non paramétriques: fondées surtout sur les données ancillaires.

a. Les méthodes paramétriques

Elles consistent à ignorer totalement les données ancillaires. L'apprentissage se fait donc uniquement à partir de l'image de référence et de l'image d'entrée. L'ensemble d'apprentissage est alors constitué de points de contrôle ou amers, relevés sur les deux images par une mise en correspondance locale.

La déformation entre les deux images est approchée par une fonction mathématique passant au mieux parmi les points de l'ensemble d'apprentissage [69].

b. Les méthodes physiques

Les données provenant de l'image de référence sont ignorées. Le principe d'apprentissage consiste à prendre en compte les données ancillaires pour en déduire l'opérateur de reconnaissance permettant le transfert de l'image d'entrée dans la géométrie de référence. Ces méthodes sont essentiellement employées pour les corrections géométriques de premier niveau (correction de distorsions systématiques) ou pour les problèmes de recalage sur cartes où ,en fait, le problème majeur se résume en une projection sur un plan tangent à la surface terrestre défini par le système de coordonnées choisi (UTM, Lambert ...) [20] , [44], [35] .

D'autre part, dans le cas où l'angle de visée du capteur employé est très éloigné (> 10 degrés) et où la résolution au sol est fine, l'effet topographique devient très important; Une solution consiste alors à introduire un modèle numérique de terrain de manière à corriger cet effet; c'est par exemple le cas des données images provenant de SEASAT.

c. Les méthodes mixtes

Elles consistent à affiner la précision des méthodes physiques en tenant compte de quelques points de contrôle pris sur les deux images. Il y a dans ce cas deux niveaux de modélisation:

1) La modélisation de l'attitude du satellite en fonction du temps à l'aide de quelques points de contrôle et des données ancillaires: il s'agit par exemple de modèles panoramiques:

$$\phi = \phi(t, x, y, 3, P_i) \qquad \kappa = \kappa(t, x, y, 3, P_i)$$

$$\omega = \omega(t, x, y, 3, P_i)$$

2) La modélisation de la fonction de transfert de géométrie en fonction des paramètres d'attitude du satellite.

$$\delta x_T = H_0 \phi(P) + H_0 \kappa(P) h_y \theta$$

$$\delta y_T = H_0 (1 + h_y^2 \theta) \omega(P) + h(P) \Omega.$$

Cette méthode est très employée dans le cas des satellites NOAA et TIROS N où les paramètres de vol sont mesurés de façon très précise.

d. Les méthodes non paramétriques

Ces méthodes sont fondées sur l'hypothèse que les différences de coordonnées entre l'image d'entrée et l'image de référence représentent les réalisations bidimensionnelles d'une variable stochastique. La fonction de déformation entre les deux images est modélisée par la fonction de transfert d'un filtre de Kalmann. L'avantage de cette méthode est sa simplicité d'implantation et sa rapidité d'execution, une fois la fonction de transfert connue. Elle est surtout employée pour les corrections géométriques de premier niveau où la fonction de transfert est plus simple à exprimer.

Pour toutes ces méthodes, les phases de test et d'identification sont les mêmes.

De plus l'identification dans le cas d'images provenant de satellites est constituée de deux étapes; en effet le module de déformation n'est pas appliqué en tout point de l'image mais seulement aux noeuds d'une grille établie sur l'image de sortie du système. La position des points de l'image à l'intérieur des mailles de la grille est calculée par interpolation bilinéaire à partir des quatre points de la grille les plus proches.

Un compromis est à faire entre la nature de la fonction de déformation, la dimension de la grille, la répartition des noeuds de la grille sur l'image et la qualité de l'opérateur de recalage souhaitée.

Les différentes méthodes de ré-échantillonnage possibles sont celles des plus proches voisins, l'interpolation bilinéaire, ou la convolution cubique. Ici encore, le choix est guidé par l'acuité du résultat désirée.

La mesure de validité de l'opérateur de recalage qui constitue l'ultime étape de notre processus de reconnaissance de forme n'est pas simple: En général les erreurs de recalage sont très dépendantes des coordonnées dans l'image. Elles ont tendance à être plus élevées sur les bords des images, ceci est lié aux limites de validité des fonctions de déformation

appliquées. Une mesure d'erreur moyenne ne donne donc qu'une idée très approximative de l'acuité du recalage.

La limite de ces méthodes provient du fait que l'opérateur de transfert de géométrie est global. Il y a souvent incompatibilité entre le fait que cet opérateur doit être très complexe (ce qui se traduit dans la pratique par une fonction de déformation de degré élevé) de manière à bien approximer la déformation relative entre deux images et le fait que l'on désire une bonne précision sur toute l'image: En effet il y a dans ce cas un grand risque de divergence dès que l'on s'éloigne de l'ensemble d'apprentissage.

Une approche pour palier cet inconvénient est de considérer non plus des opérateurs de transfert de géométrie analytiques globaux, mais des opérateurs beaucoup plus locaux. Ce sera l'objet du troisième chapitre.

La méthode que nous avons développée est une méthode paramétrique. Un impératif de notre cahier des charges était en effet que l'opérateur de recalage soit totalement "aveugle", c'est à dire ne dépende à aucun moment de la nature des données qui lui seraient présentées. Les principales justifications de cette contrainte sont que d'une part il est parfois difficile d'accéder aux données ancillaires, de plus celles-ci ne sont pas toujours suffisamment précises pour donner des résultats satisfaisants;

d'autre part, ce logiciel s'insérant dans un logiciel général de traitement d'images en télédétection, il était important qu'il soit utilisable dans un grand nombre d'applications quitte à ce que les utilisateurs le particularisent pour leurs applications.

Les chapitres suivants décrivent les différentes étapes du processus de recalage comme nous les avons présentées dans l'introduction générale; pour chacune de ces étapes, nous développerons notre implantation et nos résultats.

SECOND CHAPITRE

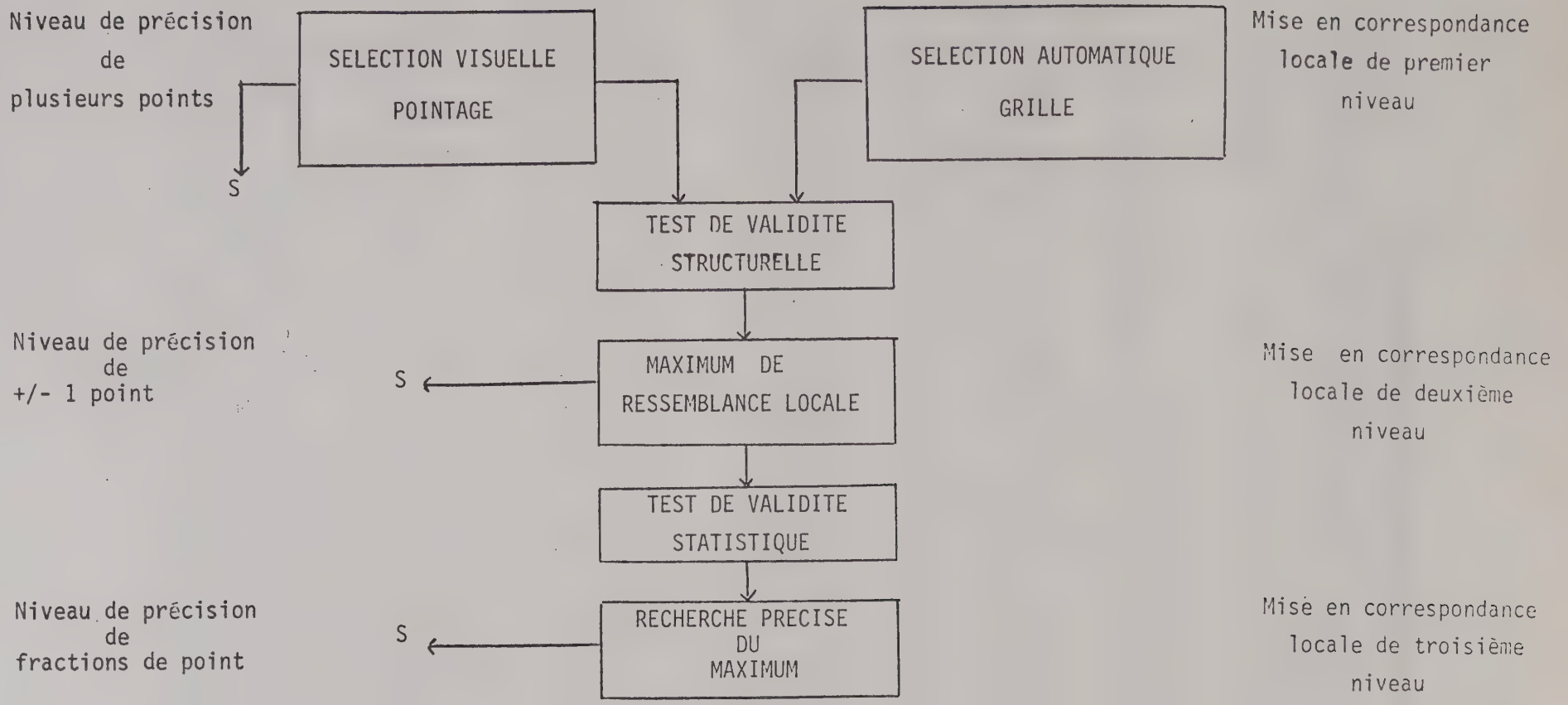
RECHERCHE HIERARCHISEE DE POINTS DE CONTROLE

La phase d'apprentissage d'un processus de reconnaissance de forme consiste en l'appréhension d'un sous-ensemble de l'espace de représentation sur lequel il est possible d'extraire des caractéristiques nécéssaires pour estimer l'opérateur de reconnaissance. Cet apprentissage peut se faire de façon supervisée, c'est à dire avec un professeur ou non supervisée. L'opérateur de reconnaissance des formes sera d'autant plus efficace que l'espace d'apprentissage aura été bien choisi dans l'espace de représentation, l'opération d'identification sur tout l'espace en sera d'autant plus précise.

En ce qui concerne l'opération de recalage, l'apprentissage consiste en la prise en compte d'une part des données ancillaires, éventuellement d'un modèle numérique de terrain et d'autre part en la mise en correspondance locale de l'image de référence et de l'image d'entrée de manière à repérer des points de contrôle ou amers.

Nous allons présenter dans ce chapitre un ensemble de techniques permettant de constituer une librairie de points de contrôle. Les méthodes employées sont plus ou moins sophistiquées en fonction du degré de précision recherché sur les coordonnées des amers. Elles se succèdent de façon hierarchique jusqu'à ce qu'on ait atteint le niveau de précision souhaité [46], [79] , [95].

On peut suivre sur la figure 6 de la page 41 les différentes étapes possibles de la construction d'une librairie de points de contrôle. Les données suivent le flot descendant jusqu'au niveau désiré par l'utilisateur.



S: Enregistrement dans la librairie de points de contrôle

Figure 6. Construction d'une librairie de points de contrôle: différentes étapes du relevé des coordonnées des points

1. MISE EN CORRESPONDANCE LOCALE DE PREMIER NIVEAU

Il s'agit dans ce premier temps de sélectionner les points de l'image d'entrée, susceptibles d'être considérés comme points de contrôle.

Deux méthodes sont couramment employées en fonction des données en présence:

a. Images issues d'un même capteur

Bien que séduisante la sélection automatique de points de contrôle pose de nombreux problèmes et n'est pas toujours réalisable. Elle consiste à poser une grille sur les deux images, les noeuds de la grille représentant les points de contrôle potentiels. A ce moment, ne connaissant pas l'opérateur de recalage entre les deux images, deux noeuds correspondant de la grille ne représentent pas les positions réelles d'une paire de points de contrôle mais ils ne désignent que la région potentielle d'un point de contrôle.

Cette méthode n'est légitime que si la fonction de transfert géométrique entre les deux images n'est pas trop complexe: c'est à dire si elle est relativement proche de la fonction identité. C'est pourquoi elle est essentiellement employée pour les applications de recalage d'images diachroniques prises par un même senseur.

D'autre part le réseau de "régions de contrôle potentielles" désigné par les noeuds de la grille étant fixe, certaines d'entre elles seront rejetées par le test de validité structurelle puis par les tests de validité statistique (figure 6 de la page 41). Il est donc clair que sur la grille, un grand nombre de points se trouveront rejetés, et que des points de contrôle réels seront omis.

Dans le cas d'études multitemporelles, on a besoin de recaler de nombreuses images sur une même image de référence; on procède, en général, à une sélection semi-automatique c'est à dire que l'on choisit un grand nombre de bons points de contrôle sur l'image de référence qui constitueront ainsi la première partie de la librairie des points de contrôle des points associés à cette région. On procède ensuite à une recherche automatique par mise en correspondance locale de ces points de contrôle sur chacune des images à recaler [27] . Cette librairie de points de contrôle peut être uniquement constituée des coordonnées des points de contrôle ou bien d'imagettes sur chacune des images autour des points de contrôle [74].

b. Images issues de capteurs différents

Dans le cas d'applications multi-sources, on préfére une sélection visuelle: Elle se fait sur des documents papiers soit directement sur un écran de visualisation image par l'intermédiaire d'une boule, d'un "joystick" ou d'une tablette.

L'utilisateur choisit pour chaque paire d'images, les points de contrôle qui lui semblent les meilleurs pour l'estimation de l'opérateur de déformation [76]

La précision de la saisie dépend de la qualité des images, de leur "distance" géométrique et de l'acuité visuelle de l'utilisateur.

Plus la paire d'images à recaler est éloignée géométriquement parlant plus l'analyse d'un voisinage d'un point de contrôle est nécessaire pour repérer précisement celui-ci.

On peut lier à la notion de points de contrôle une structure pyramidale dont les niveaux correspondent à la précision de coïncidence locale désirée (figure 7 de la page 44) [90]

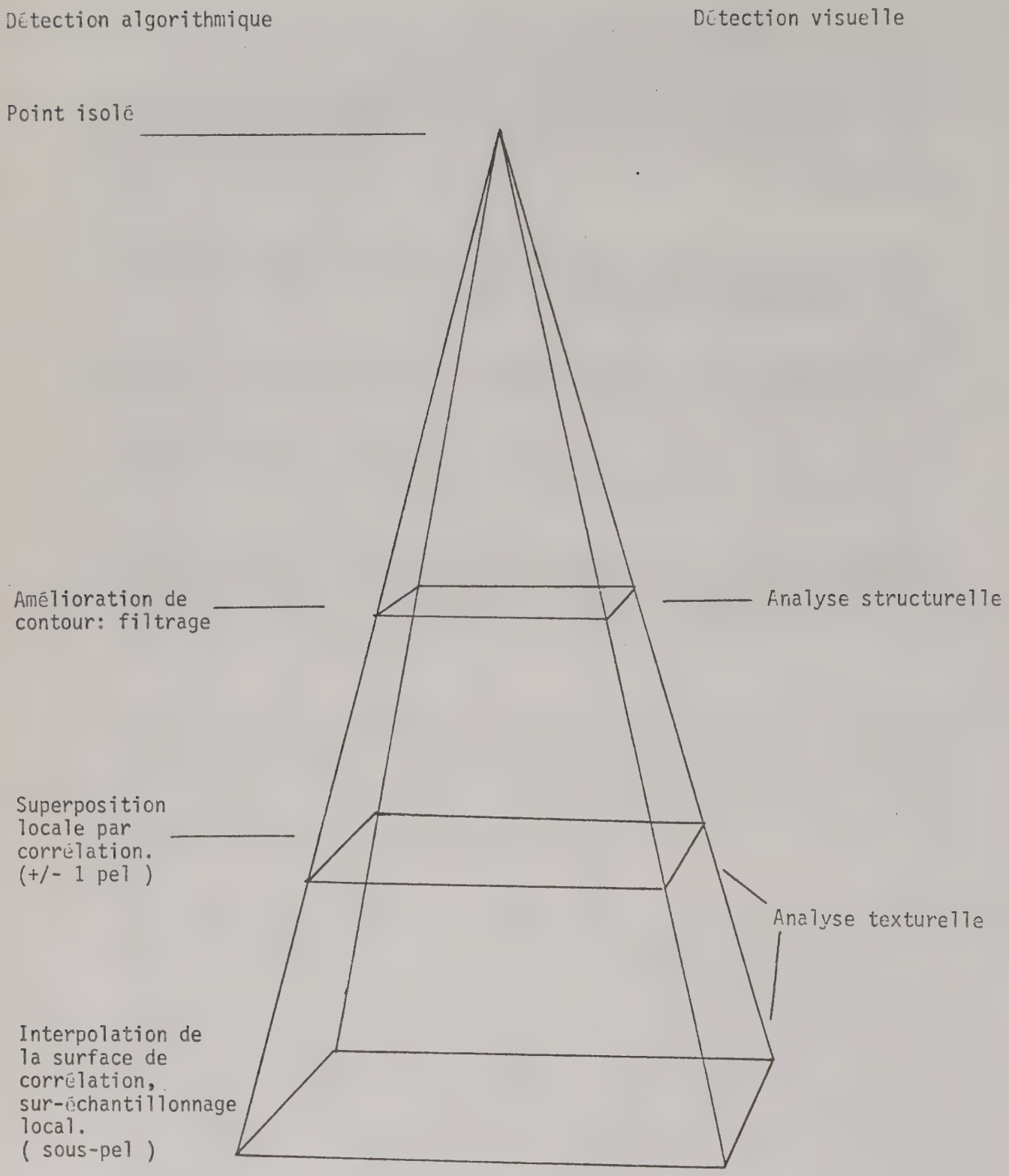


Figure 7. Structure pyramidale associée à un point de contrôle

Au sommet de la pyramide, le point de contrôle est considéré comme un point isolé, c'est par exemple le cas de la sélection automatique ce qui explique le manque de robustesse de cette méthode face aux données.

Sous-jacent à cette remarque, une caractéristique importante d'un point de contrôle est qu'il doit être indépendant des radiométries spécifiques de l'image.

Autrement dit il existe très peu de points de contrôle isolés (sommet de la pyramide).

D'autre part, la précision réalisée au sommet de la pyramide est de plusieurs points élémentaires sur l'image aussi bien par sélection automatique que visuelle. Néanmoins, lors d'une sélection visuelle, il est rare de rester à ce sommet; en effet l'oeil fait une analyse structurelle de l'image puis une analyse de texture locale de façon très approfondie en fonction de la qualité de précision que l'on veut atteindre. Il est clair que l'oeil fait des montées et des descentes dans la pyramide associée à un point de contrôle jusqu'à ce que l'utilisateur soit satisfait du point. Ce point isolé n'en reste pas moins inexact de part le manque de précision des moyens de relevé des coordonnées des points, de la qualité des images.

Dans la plupart des cas, la base de la pyramide est carrée pour des raisons de simplicité algorithmique; néanmoins rien n'empêche qu'elle soit rectangulaire ou même circulaire, en particulier il est sur que l'oeil a une approche d'analyse de texture par des voisinages circulaires [42].

Un test de validité est nécessaire pour descendre d'un étage dans la pyramide. Ce test est adapté à l'étage après lequel il intervient dans la pyramide. Ainsi entre le deuxième et le troisième étage, il s'agit d'un test de validité structurelle (test de prévalidation). Entre le troisième niveau et le quatrième niveau, il s'agit d'un test de validité statistique (test de post-validation) [53], [57] , [58] .

Indépendamment des différences spectrales, deux images ont, en général, des niveaux de signal différents; ceci est du au changement d'illumination de la scène, aux variations des propriétés optiques de l'atmosphère, au changement de saison ou d'angle solaire, de plus la réflectivité du sol dépend des conditions climatiques de la région au moment de la prise de vue (neige, inondation, humidité....); Il est donc

nécessaire que les points de contrôle soient sélectionnés indépendamment de la radiométrie de l'image. Les méthodes de test de validité sont de deux types:

-Soit elles s'affranchissent totalement des radiométries en travaillant sur un voisinage filtré du point de contrôle en question.

-Soit elles procèdent à une normalisation de façon à rendre "compatibles" les radiométries aux voisinages des points de contrôle sur l'image de référence et sur l'image d'entrée.

Les tests de validité structurelle utilisent la première méthode alors que les tests de validité statistique utilisent la seconde.

2. TEST DE VALIDITE STRUCTURELLE

Ils consistent à ne conserver que les points "forts" de structure c'est à dire présentant des discontinuités de luminance non rectilignes importantes.

Plusieurs techniques sont couramment employées pour rechercher les contours locaux.

Citons par exemple:

a) Filtrage dérivateur: extraction de contours locaux [66] .

b) Filtrage adapté [14] ,

c) Extraction de contours par dérivation après lissage et sur-échantillonnage fictif. [52] , [54] , [55] .

a. Extraction de contours locaux

Il existe un grand nombre de méthodes d'extraction de contour. Il est difficile de définir une technique optimale indépendante de la nature des images (dynamique, texture,...).

Les méthodes les plus couramment employées sont les méthodes de gradient telles que Sobel, Robert, Prewitt, laplacien etc ...

SOBEL

$$H(1)=\begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix} \qquad H(2)=\begin{vmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}$$

$$G = \text{Max}(H(1), H(2))$$

ROBERT

$$H(1)=\begin{vmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} \qquad H(2)=\begin{vmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$G = \text{Max}(H(1), H(2))$$

PREWITT

$$H(1)=\begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix} \qquad H(2)=\begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

$$G = \text{Max}(H(1), H(2))$$

LAPLACIEN

$$H(1)=\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

Malheureusement ces méthodes sont toutes très sensibles au bruit; c'est à dire que les points isolés ayant une radiométrie différente du fond seront extraits quelle que soit leur organisation spatiale.

L'information de connectivité locale et l'emploi de règles de connection de bords (par exemple par codage de Freemann) réduisent la sensibilité au bruit de ces opérateurs.

D'autre part, une mesure floue peut être associée à chaque contour sur une fenêtre quantifiant ainsi sa robustesse locale.

D'autres techniques consistent à procéder par affinements itératifs sur un voisinage 5x5 dans certaines directions privilégiées (les quatre ou huit directions principales) et à ne retenir qu'un certain pourcentage des valeurs les plus hautes de l'histogramme, à la N ième itération.

D'autres méthodes plus globales peuvent également être employées; elles sont en général plus sophistiquées et moins sensibles au bruit: citons par exemple la méthode d'Ashkar-Modestino qui consiste en une première étape d'extraction de bord et en une deuxième étape de génération de contour, et celle de L. Asfar effectuant une segmentation de l'image particulièrement bien adaptée aux images de télédétection [4], [5] .

b. Filtrage adapté

Le problème consiste à effectuer un filtrage localement autour des points de contrôle recherchés de manière à faciliter la détection de pic de corrélation lors de la mise en correspondance locale de deuxième niveau.

Le filtrage doit donc avoir pour effet de rendre la surface de cross-corrélation entre l'image de référence et l'image d'entrée beaucoup plus régulière partout sauf en son maximum représentant la position réelle du point de contrôle qui, au contraire doit être affinée et renforcée.

L'idée est donc de maximiser le rapport entre la valeur maximale de cross-corrélation dans le voisinage du point recherché et la variance des valeurs de cross-corrélation dans ce voisinage en introduisant les caractéristiques statistiques de l'image de référence.

$$Z = \frac{R^2(i^*, j^*)}{\text{var}\,(R(i,j))}$$

Alors, moyennant des hypothèses simplificatrices sur les propriétés statistiques des images (en particulier une hypothèse de stationnarité) , la fonction de transfert du filtre peut s'exprimer comme suit:

$$H = \begin{pmatrix} \rho^2 & -\rho(1+\rho^2) & \rho^2 \\ -\rho(1+\rho^2) & (1+\rho^2)^2 & -\rho(1+\rho^2) \\ \rho^2 & -\rho(1+\rho^2) & \rho^2 \end{pmatrix}$$

où ρ est le coefficient de corrélation moyen entre points voisins sur l'image de référence.

Si l'image est tout à fait décorrélée spatialement, alors $\rho = 0$ et :

$$H = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Au contraire, si elle est totalement corrélée, alors $\rho = 1$, le noyau du filtre devient :

$$H = \begin{vmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{vmatrix}$$

Ce qui n'est rien d'autre qu'un filtre dérivateur.

c. Extraction de contours par dérivation après sur-échantillonnage fictif et lissage

Cette méthode développée par R. Jeansoulin est décomposée en trois étapes :

1) Un sur-échantillonnage fictif pour introduire une redondance spatiale de l'information. il s'agit d'une duplication des points dans les deux directions.

Figure 8. Sur-échantillonnage fictif

2) Un lissage conservant localement la zone de plus grande homogénéité: On définit sur la fenêtre 4x4 obtenue après le sur-échantillonnage, 9 zones correspondant chacune à une direction particulière. On affecte alors à chaque point la valeur moyenne de la zone de variance minimale (la plus homogène). Si toutes les zones sont très hétérogènes, leurs variances étant supérieures à un seuil, la valeur initiale est conservée.

3) Un filtrage dérivateur suivant les quatre directions principales

Cette méthode, testée sur Landsat MSS et Daedalus dans la région Toulousaine, a donné de très bons résultats. Elle donnera probablement de très bons résultats sur SPOT compte tenu de sa résolution au sol (10 et 20 mètres) et de l'unité de surface des parcellaires agricoles européens (environ 50*50 mètres) [91] .

3. MISE EN CORRESPONDANCE LOCALE DE DEUXIEME NIVEAU: RECHERCHE DE LA MEILLEURE COINCIDENCE LOCALE

Il s'agit à ce point (figure 9 de la page 53) d'affiner la localisation du point de contrôle au point élémentaire près.

Notre problème consiste à mettre en correspondance au pel près les voisinages du point de contrôle recherché sur l'image d'entrée et sur celle de référence. Il devient donc nécessaire de considérer autour de chaque point de contrôle, localisé grossièrement au cours de l'étape précédente, un voisinage que nous appelerons aire de référence sur l'image de référence et une aire de recherche sur l'image d'entrée.

Deux solutions sont envisageables:

Soit F la fenêtre de balayage sur laquelle est mesurée la mise en correspondance des deux aires. figure 9 de la page 53

a) On peut considérer F fixée au centre de l'aire de référence ce qui signifie que l'on considère le point central de l'aire de référence comme point de contrôle exact. Ce n'est pas dénué de sens dans la mesure où l'image de référence est représentée dans une géométrie qui est mieux adaptée à la scène observée, il est donc légitime de penser que la sélection de premier niveau a été plus précise.

b) On peut également considérer que le point de contrôle réel est quelque part dans l'aire de référence.

Si la fenêtre F est constituée de NxN points

L'aire de référence de MxM points

Il y a donc (M-N+1) positions possibles de la fenêtre dans l'aire de référence.

Des critères de pré-validation des points de contrôle sont alors nécessaires pour renforcer les critères de sélection de la position des points de contrôle dans l'aire de référence indépendamment de l'image d'entrée.

On considérera dans la suite la fenêtre F fixe.

La mise en coïncidence locale de l'image d'entrée et de l'image de référence nécessite un outil permettant de mesurer la ressemblance locale des deux images.

Deux cas sont envisageables;

- Les géométries des deux images sont relativement proches;

c'est le cas par exemple d'études multitemporelles. Dans ce cas, les voisinages autour de deux points homologues sur l'image d'entrée et sur l'image de référence correspondent relativement bien à la même région au sol, il est donc légitime d'évaluer une mesure de distance entre ces deux voisinages.

- Les géométries des deux images sont très différentes;

c'est le cas d'images provenant de diverses sources. Dans ce cas, les voisinages autour de deux points homologues sur les deux images ne correspondent plus du tout à la même région au sol. Il est clair qu'alors, la comparaison de ces deux voisinages n'a plus de sens. Un prétraitement géométrique sera donc nécessaire.

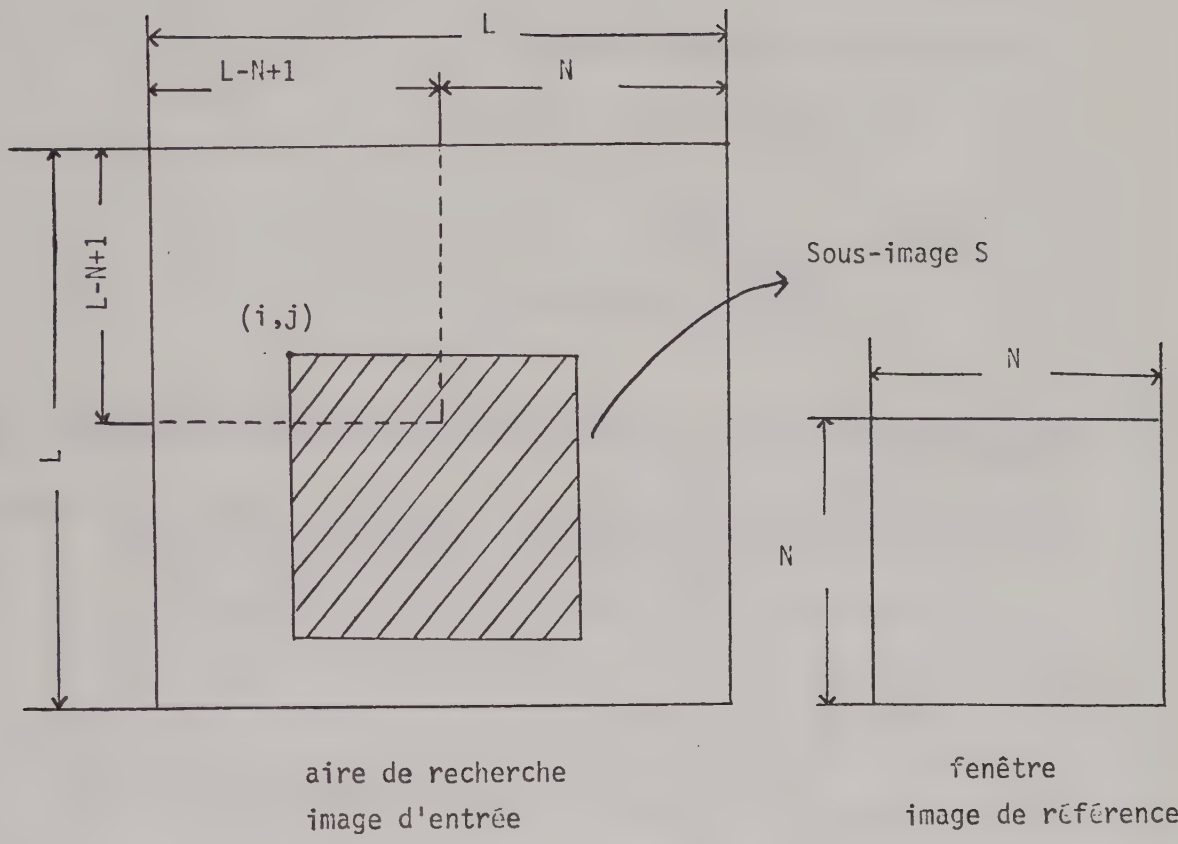


Figure 9. Recherche de la meilleure coïncidence locale par cross-corrélation

Présentons maintenant différentes techniques usuelles de mesures de ressemblance.

Il s'agit de mesurer la coïncidence locale entre la fenêtre F et toutes les fenêtres de mêmes dimensions dans l'aire de recherche et d'extraire celle ayant le maximum de ressemblance avec la première. Toutes les distances classiques sur des espaces à 2 dimensions sont possibles; citons pour exemple:

- Distance des valeurs absolues

$$d_1 = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} |f(i,j) - g(i,j)|$$

- distance quadratique

$$d_2 = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} (f(i,j) - g(i,j))^2$$

a. Algorithme SSDA (Sequential Similarity Detection Algorithm) [7]

Cet algorithme développé par Daniel I. Barnea et Harvey F. Silverman utilise les distances de valeurs absolues:

$$d_3(m,n) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} |f(i,j) - \hat{f} - g_{m,n}(i,j) + \hat{g}_{m,n}|$$

$$\hat{f} = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} f(i,j)$$

$$\hat{g}_{m,n} = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} g_{m,n}(i,j) \qquad \text{(zone hachurée figure 9)}$$

L'ordre de comparaison des paires fenêtre - sous-image de l'aire de recherche est aléatoire; d'autre part un seuil permet de stopper le calcul de d dès que la distance entre les deux sous-images devient trop grande. Un grand nombre de points est donc éliminé très rapidement.

Une amélioration de la méthode consiste à ne pas fixer la valeur du seuil mais à ce qu'il soit croissant de façon monotone, au fur et à mesure des itérations du calcul de la distance entre la fenêtre et la sous-image S.

Cet algorithme est 50 fois plus rapide que l'algorithme de calcul de corrélation par FFT. Néanmoins ses performances ne sont pas en rapport avec la complexité d'implantation qu'il nécessite, figure 10 de la page 56 en particulier pour fixer la valeur du seuil ou de la droite de seuil.

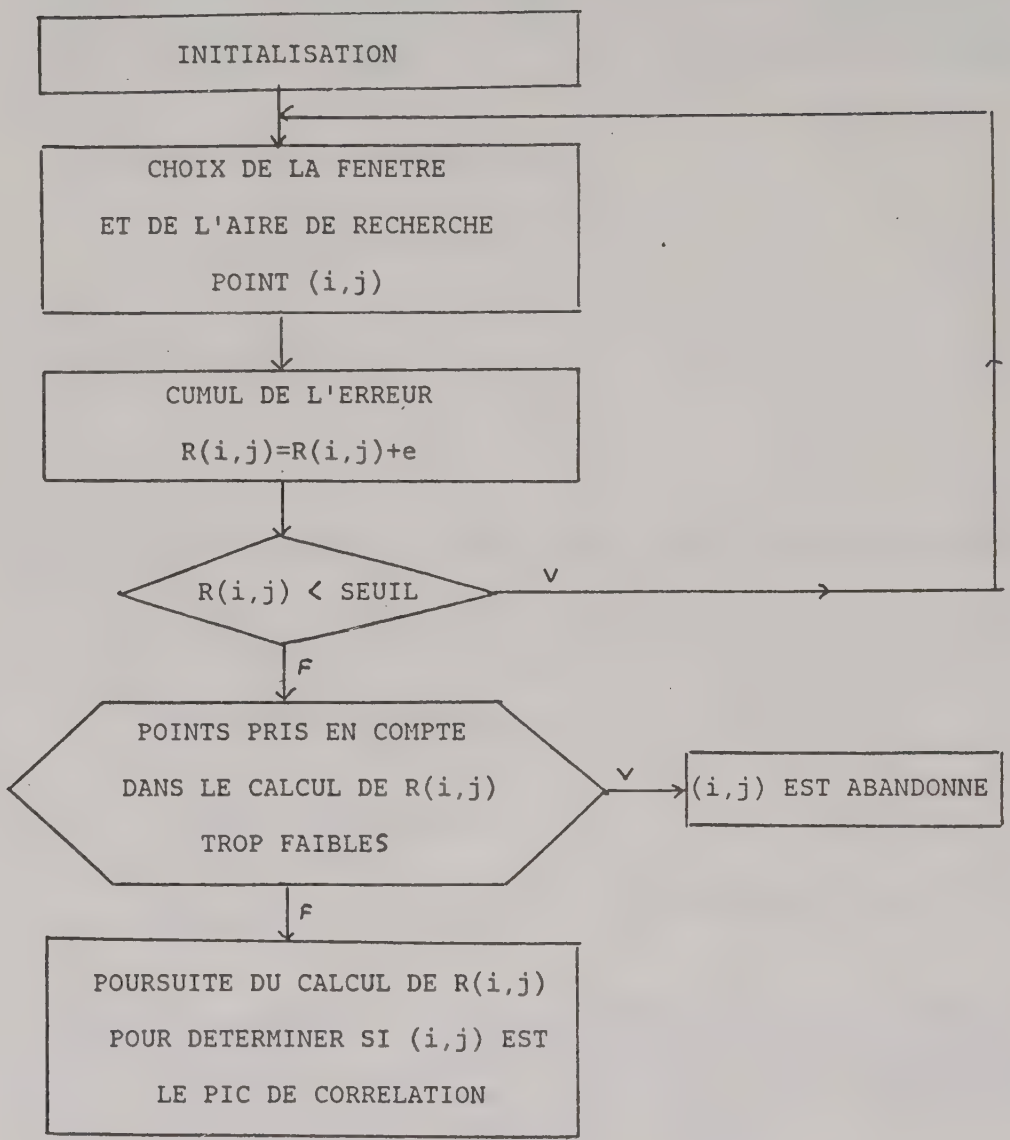


Figure 10. Organigramme de l'algorithme SSDA

b. Mesure de ressemblance par cross-corrélation statistique

[91], [22] En fait, on préfère à ces algorithmes où les distances utilisées sont cumulatives et ne prennent pas en compte les propriétés statistiques locales des voisinages des points de contrôle recherchés, des algorithmes de calcul de mesure de ressemblance normalisée par l'écart type des valeurs radiométriques prises en compte dans le calcul.

Les méthodes de mesure de ressemblance par cross-corrélation statistique donnent en particulier de bons résultats [25]

$$R(i,j) = \frac{\left| \sum_{p=1}^{N} \sum_{k=1}^{N} \left(f(p,k) - \hat{f} \right) \left(g_{(i,j)}(p,k) - \hat{g}_{(i,j)} \right) \right|}{\left[\sum_{p=1}^{N} \sum_{k=1}^{N} \left(f(p,k) - \hat{f} \right)^2 \cdot \sum_{p=1}^{N} \sum_{k=1}^{N} \left(g_{(i,j)}(p,k) - \hat{g}_{(i,j)} \right)^2 \right]^{1/2}}$$

Plusieurs algorithmes permettent de faire ce calcul [7] :

1) Calcul direct

C'est cette méthode que nous avons développée moyennant un calcul glissant pour accélérer la procédure. (cf chapitre 4)

2) Transformée de Fourier rapide [2]

Ceci permet de calculer le numérateur de R de façon très rapide

On utilise, en effet, le théorème de convolution

$$f * g = \mathcal{F}^{-1} (F^* . G)$$

où F^* signifie la transformée de Fourier conjuguée de f

G la transformée de Fourier de g

$*$ le produit de convolution

$\mathcal{F}^{-1}$ la transformée de Fourier inverse

3) Recherche séquentielle

Il est clair que tous les points de l'aire de recherche n'ont pas la même probabilité d'être point de contrôle ; en principe, si la sélection de premier niveau a été correcte les points au centre de l'aire de recherche ont une forte probabilité d'être le point de contrôle recherché, au contraire plus on se rapproche des bords plus la probabilité diminue. Un balayage de la fenêtre tenant compte de l'ordre de préférence des points peut améliorer considérablement le temps de recherche du maximum de cross-corrélation avec toutefois la restriction que l'on atteint alors qu'un maximum relatif de l'aire balayée.

4) Corrélation d'images binaires: corrélation de graphe

Lorsque les images ont été filtrées et binarisées, le calcul de la matrice de cross-corrélation devient plus simple puisque les valeurs radiométriques sont binaires.

Citons deux types de mesure de corrélation utilisée dans ce cas:

- OU EXCLUSIF (distance de Hamming)

$$R(i,j) = \sum_{p=1}^{N} \sum_{k=1}^{N} f(p,k) \text{ . OUEX. } g_{(i,j)}(p,k)$$

- FORMULE DE NACK (mesure de ressemblance des contours)

$$R(i,j) = \frac{\sum_{p=1}^{N} \sum_{k=1}^{N} f(p,k) \text{ . ET. } g_{(i,j)}(p,k)}{\sum_{p=1}^{N} \sum_{k=1}^{N} g_{(i,j)}(p,k)}$$

Ces distances ont l'avantage d'être implantables très facilement aussi bien en software qu'en hardware.

Il est sûr que ce type de recherche de ressemblance est très attrayant de part la simplicité des calculs et la rapidité de leur éxécution, cependant cela ne donnera de bons résultats que lorsque le point de contrôle est situé sur un contour bien net. La plupart du temps, en télédétection, ces méthodes sont insuffisantes, l'information contenue dans les imagettes à comparer ayant été trop comprimée.

4. TEST DE VALIDITE STATISTIQUE

La mise en correspondance de deuxième niveau correspond au calcul d'une matrice de corrélation (mesure de ressemblance ou de dissemblance), il s'agit maintenant de rechercher dans cette matrice le coéfficient maximum, car il correspond à la position du point de contrôle recherché en coordonnées entières.

La précision du point de contrôle est alors de +/- 0.5 pel que nous majorons à +/-1 pel pour rester en coordonnée entière dans le referentiel choisi.

Le test de validité statistique porte sur la forme de la surface représentée par la matrice de corrélation et particulièrement sur les propriétés suivantes du pic de corrélation: [58]

- son existence, c'est à dire sa hauteur relativement à la valeur moyenne de la surface.

- son unicité dans la surface considérée

- sa cohérence locale: on considère en effet que la surface de corrélation obéit à une loi normale centrée sur son maximum.

- sa largeur

A la suite de ces tests, le point de contrôle peut être rejeté ou conservé.

S'il est conservé et si une précision inférieure au pel est demandée, on descend d'un étage dans la pyramide associée au point de contrôle pour accéder à la mise en correspondance locale de troisième niveau.

5. MISE EN CORRESPONDANCE LOCALE DE TROISIEME NIVEAU

Il s'agit cette fois de localiser le point de contrôle recherché avec une précision inférieure au pel connaissant sa position en coordonnées entières.

. Deux méthodes sont couramment employées:

a. Sur-échantillonnage local

Il s'agit de sur-échantillonner les voisinages des points de contrôle sur l'image de référence et sur l'image d'entrée et de rechercher à nouveau le maximum de corrélation.

Cette méthode est cependant très lourde, elle a deux inconvénients:

le premier est de nécessiter le ré-échantillonnage de l'aire de référence et de l'aire de recherche, le deuxième est qu'elle ne tient pas compte du calcul précédent de la matrice de corrélation.

b. Interpolation de la surface de corrélation

Cela consiste à interpoler, sur une fenêtre 5x5 autour du pic, la surface de corrélation précédemment calculée.

Cette méthode est beaucoup plus élégante que la précédente et donne de très bons résultats; une interpolation au dizième de pel est couramment employée.

Etant donné la forme en "cloche" du pic de corrélation, une interpolation polynomiale utilisant les polynomes de Lagrange est tout à fait adaptée.

$$PL_4(x,y) = \sum_{i=1}^{5} \sum_{j=1}^{5} A_i(x)\, A_j(y)\, R(i,j)$$

avec $$A_i(x) = \prod_{\substack{K=1 \\ K \neq i}}^{5} \frac{x-K}{i-K}$$

6. PRETRAITEMENT GEOMETRIQUE

Lorsque l'image de référence et l'image d'entrée ont des géométries très différentes, une simple corrélation entre les deux images n'a aucun sens puisqu'elles ne sont pas superposables. Si une mesure de ressemblance locale par corrélation classique est tout à fait significative dans le cas d'images multitemporelles; cela devient inutilisable dans le cas d'images multi-sources; s'ajoutent alors aux différences de codage et d'échelles radiométriques, les problèmes de différences de résolution et de géométries.

Il est clair qu'un prétraitement radiométrique et géométrique devient alors indispensable pour donner un sens à la mesure de ressemblance entre les deux images (figure 11 de la page 62)

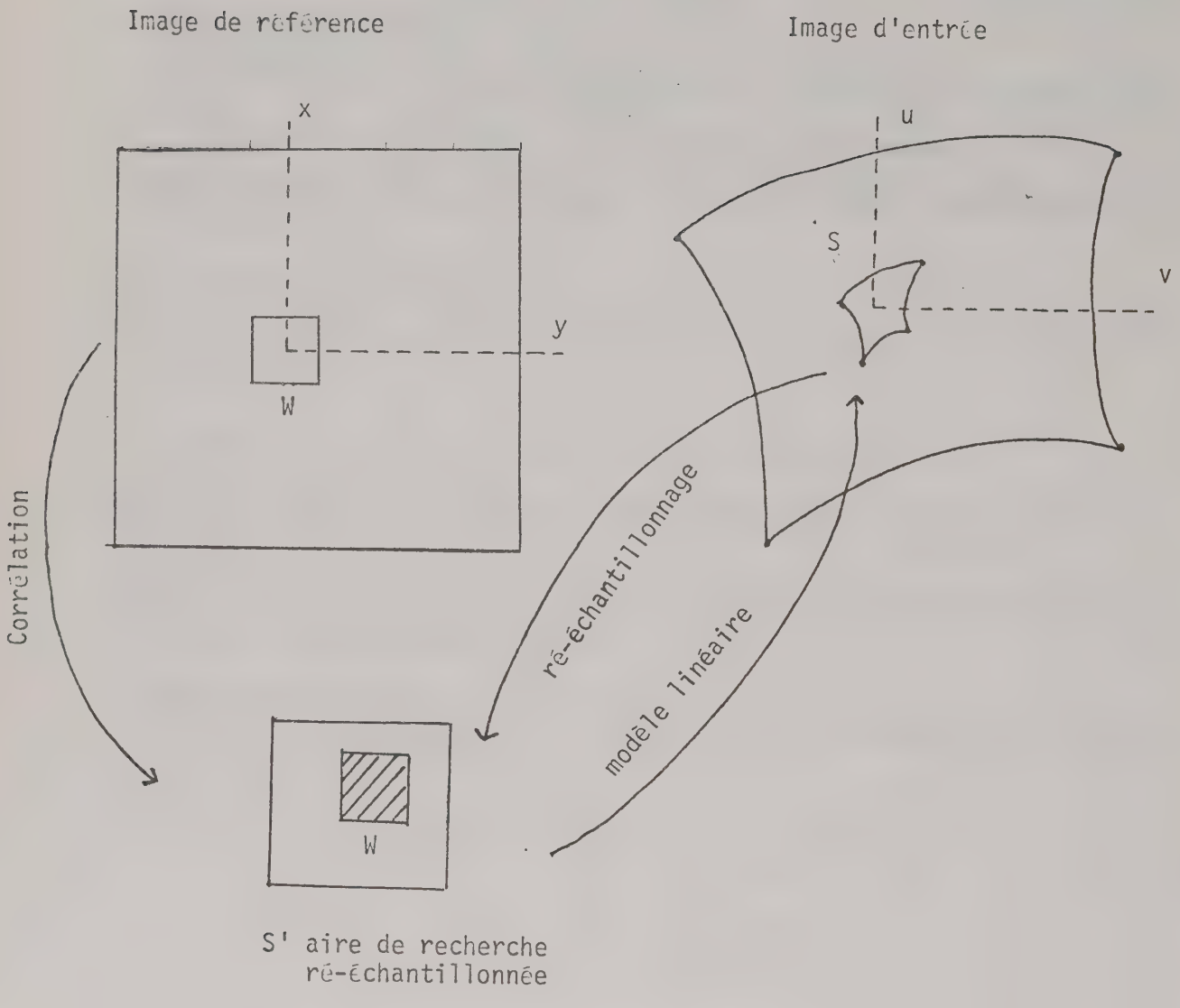


Figure 11. Prétraitement géométrique nécessaire à la corrélation d'images multi-sources.

Soit (u,v) et (x,y) une paire de points de contrôle correspondant.

On commence par calculer un modèle grossier de déformation entre les deux images à recaler (correction du facteur d'échelle, de rotation, et de translation entre les deux images), ceci à partir de quelques points de contrôle. On peut alors ré-échantillonner une aire de recherche S' autour du point (x,y)' dans une géométrie très similaire à celle de l'image de référence. La corrélation peut alors être faite entre W et S'.

La position correspondante au point de contrôle dans l'image de référence est trouvée en recherchant le maximum de corrélation.

Les coordonnées de ce point sont alors retransférées dans l'image d'entrée à l'aide du modèle de déformation grossier. (chaque point de contrôle a donc sa propre fenêtre de référence et sa propre aire de recherche.)

ALGORITHME CORRESPONDANT AU PRE-TRAITEMENT GEOMETRIQUE

Acquisition de quelques points de contrôle bien distribués sur l'image.

Calcul d'un modèle de déformation linéaire.

BOUCLE SUR LES POINTS DE CONTROLE.

Ré-échantillonnage de la zone de recherche.

Recherche du maximun de corrélation.

Conversion dans l'espace d'entrée.

TROISIEME CHAPITRE

MODELISATION: ESTIMATION DE LA FONCTION DE TRANSFERT GEOMETRIQUE

Il s'agit à cette étape d'estimer l'opérateur de reconnaissance entre l'image d'entrée et l'image de référence.

Cette estimation se fait à partir de l'ensemble d'apprentissage suivant certains modèles dont il faudra déterminer les paramètres.

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre (paragraphe 6), les modèles proposés peuvent être plus ou moins complexes en fonction de la déformation géométrique réelle des deux images et de la précision du recalage souhaitée.

Nous ne parlerons pas dans ce chapitre des modèles faisant intervenir les données ancillaires; Leur inconvénient, nous l'avons vu est d'être trop spécifique. Nous recherchons des modèles suffisamment généraux pour s'appliquer à toute sorte de données quelque soit leur provenance.

Nous présentons dans ce chapitre différentes mèthodes paramétriques permettant un recalage suffisamment précis.

Nous avons envisagé deux points de vue:

1) Le premier est de considérer que la déformation ne comprend que des fréquences spatiales basses. Ce qui signifie que la déformation peut être identifiée à une fonction continue dont la période est grande par rapport aux dimensions de l'image. Nous pouvons alors considérer la déformation comme une fonction unique des coordonnées de l'image. En fait cela revient à filtrer toutes les composantes hautes fréquences de la déformation.

2) Le second point de vue est de considérer que la déformation peut avoir des composantes haute-fréquences. Dans ce cas, nous ne pouvons pas modéliser la déformation comme une fonction analytique continue unique sur toute l'image mais comme des fonctions locales évoluant de façon continue de l'une à l'autre en fonction de la position sur l'image.

Dans le premier cas, on parle de modèles globaux, dans le second de modèles régionaux. Dans tous les cas, il s'agit d'approximer deux fonctions (horizontale et verticale) de deux variables. telles que:

$$U = f(x,y)$$

$$V = g(x,y)$$

(U,V) étant les coordonnées d'un point quelconque dans la géométrie d' entrée.

(x,y) celle du point correspondant dans la géométrie de l'image de référence.

1. MODELISATION GLOBALE

Dans le cas d'une modélisation globale de la déformation, une méthode optimale (c'est à dire donnant la meilleure approximation de f et de g) consiste à faire une projection sur un système de fonctions polynomiales moyennant les contraintes :

$$\min|f - \hat{f}|$$

$$\min|g - \hat{g}|$$

f et g représentant les approximations de f et de g en tout point (x,y) de l'image.

Ceci est justifié par la propriété topologique de densité de l'espace des fonctions polynomiales dans l'espace des fonctions continues.

Plusieurs types de polynômes peuvent être employés. Les polynômes simples à deux variables sont couramment utilisés; néanmoins les polynomes orthogonaux (Tchebycheff, Laguerre, Legendre ou Hermite) ont l'avantage d'éviter les problèmes d'instabilité numérique lorsque les points sont bien placés de manière à respecter les conditions d' orthogonalité des fonctions polynomiales.

Nous allons présenté dans ce paragraphe deux méthodes permettant d'estimer les coefficients des polynômes horizontaux et verticaux

a. par la méthode des moindres carrés

b. par analyse structurelle de l'espace de modélisation

a. Par la méthode des moindres carrés

La norme utilisée pour l'évaluation des contraintes de minimisation ci-dessus est la norme quadratique (l'algorithme des moindres carrés implanté est présenté en annexe A)

L'avantage de cette méthode est qu'elle répartit globalement les erreurs commises sur les points de contrôle Par contre, il est clair qu'elle est très sensible à la position de ces points. On ne contrôle l'allure de la fonction de transfert géométrique ainsi estimée que là où elle est accrochée par des points de contrôle.

Il est donc primordial que les points soient bien répartis sur l'image et qu'ils soient d'autant plus nombreux dans les régions de l'image où la déformation est plus fluctuante (par exemple sur les bords).

Cette méthode est de plus très sensible aux points abérrants mais ceux-ci sont très vite éliminés dans les phases de tests.

Toutes ces remarques sont d'autant plus marquées que l'ordre des polynômes approximant la fonction de transfert géométrique est élevé.

Cela reste néanmoins la méthode la plus couramment utilisée.

b. Par analyse structurelle de l'espace de modélisation [89]

Supposons que l'utilisateur choisisse des fonctions polynomiales de degré N, les coefficients de chaque polynôme (horizontal et vertical) seront au nombre de (N+1)*(N+2)/2 .

Soit T l'espace de Modélisation et soit (N+1)*(N+2)/2 sa dimension, un polynôme de transfert géométrique sera donc représenté dans cet espace par un point.

La démarche de cette méthode consiste à repérer des "zones de contrôle" sur l'image de référence et sur l'image d'entrée.

Des points de contrôle sont repérés sur chacune de ces zones. Une transformation géométrique est alors évaluée pour recaler chaque zone de contrôle de l'image d'entrée sur la zone de contrôle homologue sur l'image de référence.

A chacune des K zones ainsi repérées est donc associée une transformation géométrique T(i) représentée par un point dans l'espace de modélisation T.

Une étude de la structure du nuage de points ainsi formé dans T permet d'estimer la transformation géométrique globale à

effectuer sur l'image d'entrée pour la recaler sur l'image de référence

- La surface du nuage de points dans l'espace T donne une validation quantitative du type de transformation choisi à priori: En effet, s'il se forme un "cluster" dans cet espace, son centroïde peut être considéré comme le point représentatif de la transformation globale satisfaisante. La surface de ce "cluster" permet d'associer un facteur de mérite à la transformation en question.

Le seuil au delà duquel on ne peut plus considérer que le nuage de points forme un "cluster" représentatif de la déformation globale de l'image dépend à la fois de l'image en elle-même et de la qualité du recalage souhaité.

Nous verrons dans le paragraphe suivant comment améliorer la précision du recalage en analysant plus profondemment la structure de ce nuage de points.

L'intérêt de cette méthode est qu'elle permet à partir d'une analyse géométrique locale de l'image d'extraire une transformation globale dont on sait quantifier l'efficacité; C'est à dire une estimation globale de la qualité du recalage.

2. ETUDE DE MODELISATIONS REGIONALES DES DEFORMATIONS SUR LES IMAGES MULTISOURCES.

Les modèles polynômiaux utilisés pour approcher des déformations globales sur les images multisources doivent être de degré relativement élevé (2,3,5....) de manière à obtenir des résultats de recalage satisfaisants; en outre, ils ne sont pas suffisants dans le cas d'images provenant de scanners aéroportés.

Par contre les termes de degré élevé induisent par endroit sur l'image des abérrations dues à la divergence entre la déformation elle-même et sa modélisation.

Pour palier ces aberrations inadmissibles dans le cas où le recalage d'une scène doit être tres précis, il est proposé d'utiliser différents modèles s'appliquant localement sur l'image. Trois solutions ont été envisagées; nous les développons dans les trois paragraphes suivants.

a. Modélisation par sous-images [56]

Cette méthode consiste à découper l'image en sous-images dans lesquelles les déformations seront modélisées par des polynômes de degré moins élevé. Elle comporte deux avantages:

- La rapidité de calcul des coefficients des polynômes, de plus, les modèles étant d'ordre peu élevé les erreurs dues a l' algorithme des moindres carrés seront minimisées.

-D'autre part les modèles étant appliqués sur une plus faible étendue, ils risquent moins de diverger.

Différents découpages de l'image sont possibles:

soit en fonction de la nature de l'image elle-même et des caractéristiques des déformations sur ces images,

soit arbitrairement.

Dans ces deux cas les sous-images seront des pavés carrés ou rectangulaires qu'il sera facile d'assembler lors du ré-échantillonnage.

Il est important de noter que deux modèles adjacents (c'est à dire appliqués sur des régions adjacentes) doivent, s'ils

sont différents, être continus pour éviter les discontinuitées aux frontières.

Il est en effet primordial que ce découpage artificiel de l'image ne ré-apparaisse pas sur l'image ré-echantillonnée.

Il est donc nécéssaire de considérer un terrain "neutre" entre deux régions d'une largeur adéquate permettant de passer de manière continue d'un modèle à un autre. Une largeur de 10% de la taille des sous-images semble être bien appropriée. Nous utiliserons une fonction "S" lissant les coefficients des modèles adjacents pour calculer le modèle intermédiaire appliqué dans le terrain neutre.

Pour certaines images (par exemple les images de simulation SPOT fournies par le GDTA) un découpage de l'image en bandes horizontales est suffisant car les déformations haute-fréquences sont dans le sens de la trace de l'engin porteur. Il n'existera alors dans l'image que des terrains "neutres" entre deux régions.

On pourra ensuite envisager des découpages de l'image en pavés. Dans ce cas les frontières entre régions seront sécantes, il existera donc des "terrains neutres" communs à plus de deux modèles. La fonction "S" devra alors être remplacée par une fonction "cloche". Ce système pourra en particulier s'appliquer dans le cas où les images à recaler sont de très grande taille.

Il est nécessaire que le nombre de points de repère dans chaque région soit suffisant pour l'estimation du polynome choisi.

Le calcul des coefficients des polynômes sont les mêmes que pour le modèle global. Une fois les modèles régionaux connus, nous calculerons les modèles sur les "terrains neutres".

Ce modèle de transition doit rendre continue la modélisation de la déformation sur toute l'image, autrement dit, elle doit effacer les frontières artificielles créées sur l'image.

Ceci impose que

-sur Fa le modèle "T" soit le même que le modèle "A",

-sur Fb le modèle "T" soit le même que le modèle "B".

(voir figure 12 de la page 72)

Le modèle "T" doit permettre de passer de façon continue et monotone d'un modèle à l'autre.

On peut imaginer plusieurs modèles de transition:

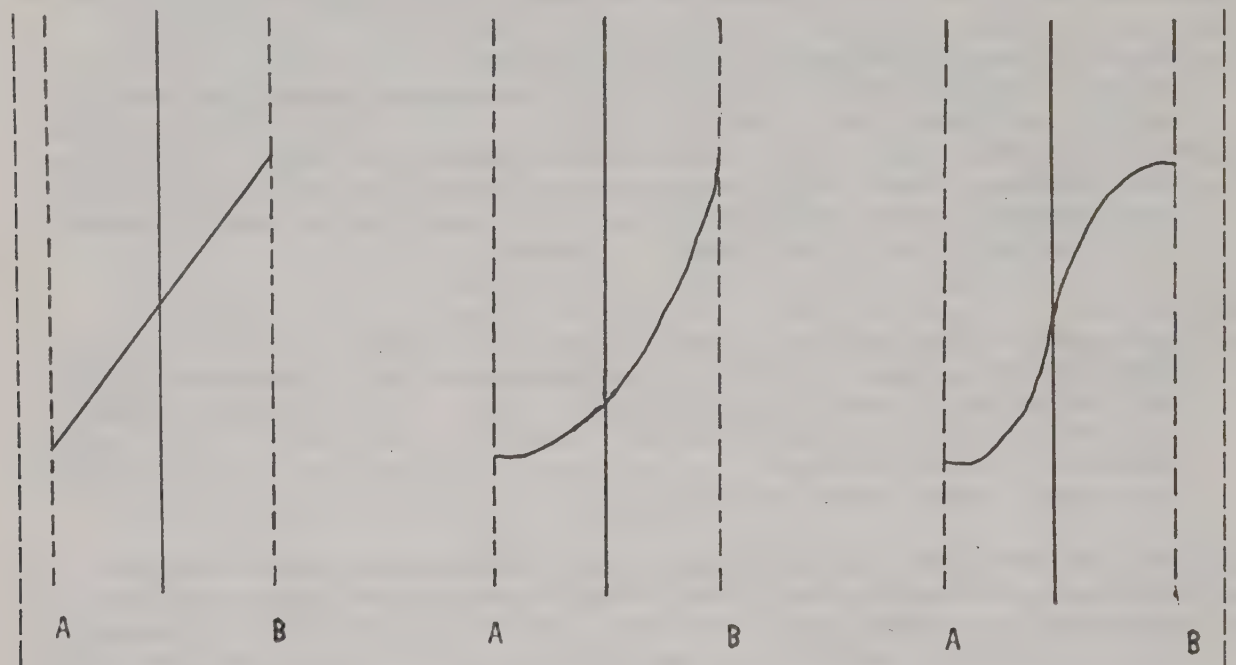


Figure 12. Modèles de transition entre deux régions voisines

a. Droite

f(a)=0 f(b)=1 condition aux limites

f(x)= az + b z = (x - a) / (b - a)

==> b = 0 et a = 1

on a donc f(x) = z

coef(T)(x) = f(x)coef(B) + (1 - f(x))coef(A)

L'inconvenient de ce modèle est qu'il n'assure pas la classe C(1) du modèle global composé des N modèles régionaux, en effet les dérivées ne seront pas forcement continues aux frontières.

b. Parabole

Ce cas est rejeté car le profil du modèle de transition ne serait pas symétrique.

c. Cubique

Il s'agit de la fonction "S" déja mentionnée; Elle réalise en outre la classe C(1) du modèle global ainsi reconstruit.

$f(a) = 0 \quad f(b) = 1$

$f'(a) = 0 \quad f'(b) = 0$ (Ce qui assure la classe C(1))

Paramétrons : $z = (x - a) / (b - a)$

ce qui permet de ramener la largeur du terrain neutre à l'intervalle (0,1), on obtient :

$$f(z) = z^2(-2z + 3)$$

Finalement:

$$Coef(T)(z) = f(z)coef(b) + (1 - f(z))coef(A)$$

La méthode comporte plusieurs inconvénients: les points de contrôle doivent être très bien répartis sur toute l'image; de plus la création de frontières artificielles rectilignes sur l'image apporte des risques de discontinuités sur l'image de sortie.

b. Modélisation par régions [61]

Le vrai problème est de segmenter l'image en régions pour lesquelles les résidus, après l'application du modèle régional associé soient plus faibles que si on avait appliqué un modèle de déformation global. Ici encore la segmentation doit être faite dans la géométrie de référence pour éviter les problèmes de mosaïque.

Plusieurs choix sont possibles:

1) Plages de résidus constants

Ayant choisi un modèle global, un classement par plages des résidus obtenus sur des points tests, en tenant compte de leur relation de voisinage, fournit un bon critère de segmentation.

2) Modèle numérique de terrain

Il est envigeasable en effet d'utiliser un modèle numérique de terrain: Il est sûr qu'une région montagneuse subira une déformation intrinsèque plus grande qu'une plaine; ceci est d'autant plus accentué que la définition de l'image est bonne et que l'angle de prise de vue est éloigné de la verticale. (par exemple imagerie radar)

Ceci nécessite un canal de topographie supplémentaire permettant de faire la segmentation. Il resterait à définir le nombre de régions et la position exacte des frontières sur le canal de topographie [67].

3) Triangulation de l'image par la méthode de Delaunay.

Cette méthode est la plus naturelle puisqu'elle ne suppose ni la connaissance d'un modèle global à priori ni l'apport d'informations externes (données ancillaires par exemple); c'est pourquoi nous la développons dans ce qui suit.

[28] , [30], [17]

Synonymes

Diagramme où Téssellation de Voronoï

Triangulation de Delaunay

Téssellation de Dirichlet

Polygone de Thiesse (utilisé en géographie)

Cellule de Wigner-Seitz (physique du solide)

Partant de points de contrôle définis sur l'image, on construit une triangulation. Elle aura un double but.

Le premier est de subdiviser l'image en triangles élémentaires sur lesquels sera appliqué un modèle linéaire défini à partir des trois points de contrôle, sommets des

triangles. Les points de contrôle doivent être choisis de façon adéquate, à savoir le plus possible équi-répartis sur toute l'image et plus nombreux dans les régions de l'image les plus perturbées. Le système de points de contrôle fournit alors une connaissance implicite du terrain (voir application de la téssellation de Voronoï à des problèmes de reconnaissance des formes par aggrégation) [96] , [1].

Le deuxième but de cette téssellation est la représentation de la déformation de l'image par un graghe dans un espace de modélisation.

a) Construction de la triangulation de Delaunay

Le diagramme de Voronoï partionne le plan en mailles disjointes telles que :

La maille du point P(i) est un ensemble T(i) défini par:

$$T(i) = (x \ / \ d(x,P(i)) < d(x,P(j)) \ i \text{ not } = j)$$

d étant la distance euclidienne.

Triangulation de Delaunay (Localement équi-angulaire)

Utilisant le diagramme de Voronoï, cette triangulation est facile à obtenir par la règle suivante:

Deux points P(i) et P(j) sont joints par un coté si et seulement si leurs mailles correspondantes sont voisines (un coté en commun); autrement dit si P(i) et P(j) sont Voronoï-voisins.

Cette triangulation a la propriété d'éliminer les triangles longs et fins pour conserver ceux qui sont les plus réguliers (les plus proches des triangles équilatéraux), ce qui lui donne un aspect local d'homogénéité que d'autres triangulations n'ont pas.

Ayant construit cette triangulation, il est possible de concevoir une déformation élémentaire dans chacun des triangles.

On choisit un modèle linéaire de manière à éliminer les problèmes de continuité sur les côtés de chaque triangle, ainsi toutes les arêtes des triangles sont stables par ces transformations; d'autre part elles ne se dédoublent pas après l'application des déformations puisque les triangles, ayant une arête commune, ont les deux sommets de cette arête communs, donc fixés par les points de contrôle. Le recalage peut être effectué à cette étape en procédant triangle par triangle. Cependant il est possible d'optimiser la mosaïque de l'image en analysant la structure de la déformation dans l'espace de modélisation, c'est l'objet du paragraphe suivant.

b) Graphe représentant la structure géométrique de l'image

La téssellation étant constituée de N triangles, on est à même de construire N modèles linéaires. Chacun des modèles est caractérisé par un triplet de coefficients : (a,b,c) correspondant aux coefficients linéaires en X et en Y et au terme constant.

Chacun des modèles M(i) peut donc être représenté par un point dans un espace à trois dimensions appelé "espace de modélisation". Notre but est maintenant d'optimiser le nombre de régions élémentaires créées sur l'image par la triangulation, et d'autre part de caractériser la déformation de l'image à l'aide de paramètres de forme extraits sur le nuage de points construit dans l'espace de modélisation.

-Aggrégation dans l'espace de modélisation.

Le nuage de points peut être représenté dans l'espace de modélisation par un graphe valué portant à la fois les informations de voisinage dans l'espace de modélisation et les informations de voisinage dans l'image à recaler.

Deux points M(i) et M(j) seront joints par une arête si les triangles correspondant T(i) et T(j) sont voisins par un sommet ou par une arête (voisins par deux sommets).

La valuation des arêtes du graphe est binaire :

0 si les triangles sont voisins par un sommet

1 si les triangles sont voisins par un coté

Si les triangles T(i) et T(j) n'ont aucun point en commun, il n'y aura pas d'arête sur le graphe dans l'espace de modélisation.

On pourra alors appliquer, pour classifier l'espace de modélisation, un algorithme des plus proches voisins sur le graphe en question; En effet la notion de plus proches voisins dans l'espace de modélisation est renforcée par la valuation du graphe apportant l'information de voisinage dans l'espace physique de l'image.

Ceci revient à agréger les triangles adjacents (un coté commun) dont les transformations sont voisines au sens d'un certain critère dans l'espace de modélisation. Il serait alors possible de prendre pour transformation résultante, par exemple, l'interpolation linéaire entre les transformations en question. Il est clair qu'alors les conditions de continuité ne seront plus vérifiées automatiquement, il faudra donc faire intervenir d'autres hypothèses pour qu'elles soient respectées.

Décelant des points M(i) très "proches" à ce sens dans l'espace de modélisation, on peut les agréger suivant la technique citée précédemment, re-créer ainsi une nouvelle transformation et donc une nouvelle région d' application : réunion des triangles concernés par les transformations initiales. Inversement si un point se trouve très isolé dans l'espace de modélisation, cela signifie qu'il correspond à un triangle dans lequel la déformation est trop spécifique par rapport à son voisinage, il faut alors se référer de nouveau à l'image: soit cet isolement est du au fait que le triangle en question est trop étendu pour qu'une transformation linéaire soit suffisante pour approximer la déformation à laquelle il est soumis, il faudra donc redécouper ce triangle en trois autres triangles et ré-itérer le procéssus; soit cet isolement correspond à une déformation intrinsèque due à un phénomène régional sur l'image, auquel cas il serait bon de la conserver (figure 13 de la page 80).

Le seuil d'agglomération et de scission dans l'espace de modélisation pourra être donné par une connaissance à priori de la distance géométrique des deux images à superposer. La précision du recalage est étroitement liée à ces deux seuils.

Cette méthode est dangereuse sur les bords de l'image où les triangles ne sont pas définis (en effet la triangulation n'est effective qu'à l'intérieur du polygone convexe formé par les points de contrôle les plus périphériques à l'image); On rejoint ici la même conclusion que par l'approche de la théorie de l'information: les points de contrôle doivent être nombreux sur les bords de l'image [76]. On sent bien que la méthode est très sensible au erreurs faites sur les

points de contrôle puisque la triangulation de l'image s'appuie directement sur ces points , il est donc nécessaire d'améliorer le plus possible la précision des coordonnées de ces points.

Une amélioration de la méthode consiste à utiliser des modèles de degré plus élevé lors de l'aggrégation de plusieurs triangles élémentaires.

Il est possible également de modifier la triangulation localement en éliminant ou en ajoutant des points de contrôle sans la recalculer sur toute l'image.(voir l'algorithme de Devijver sur l'élimination ou l'ajout de points dans une téssellation et la recherche de la nouvelle téssellation) [29] , [63].

Algorithme

Triangulation

Construction du graphe valué dans l'espace de modélisation.

Aggrégation dans cet espace et triangulation définitive.

Rectification

Ré-échantillonnage.

c) Remarque sur le ré-échantillonnage

-Il n'est plus possible d'utiliser la méthode employée dans le cas de modèles globaux, en effet la construction d'une grille rectangulaire sur l'image se trouve mal appropriée à la structure triangulaire de nos régions. Ceci implique un calcul de l'image point à point sans l'intermédiaire d'une grille, ce qui améliore d'autant plus la précision du recalage mais augmente le temps de calcul de l'image recalée.

d) discussion

Cette méthode comporte de gros inconvénients:

- lourdeur de mise en oeuvre.

- problème du à la mosaïque sur l'image de sortie.

- sensibilité à la position des points de contrôle: en effet dans le cas d'images très différentes, il est très délicat de trouver des points de contrôle bien répartis sur toute la

scène. Il n'est pas rare qu'ils soient essentiellement localisés le long d'un cours d'eau ou d'une côte. Dans ce cas la triangulation de Delaunay sera constituée de triangles très alongés et auront donc perdu l'aspect localisé permettant d'apprécier les déformations hautes fréquences de l'image;

Cette méthode permet cependant une bonne caractérisation de la déformation entre deux images . Les caractéristiques du nuage de points dans l'espace de modélisation sont à la fois globales et locales (forme générale du graphe ,longueur maximale du graphe, longueur maximale des arètes, mais aussi distances relatives des noeuds entre eux en fonction de leurs voisinages spatiaux sur l'image.) ce qui assure un bon découpage régional de l'image. Ce peut être également un moyen de mise en oeuvre de calcul de déformation à variation continue sur l'image en faisant un parcours du graphe.

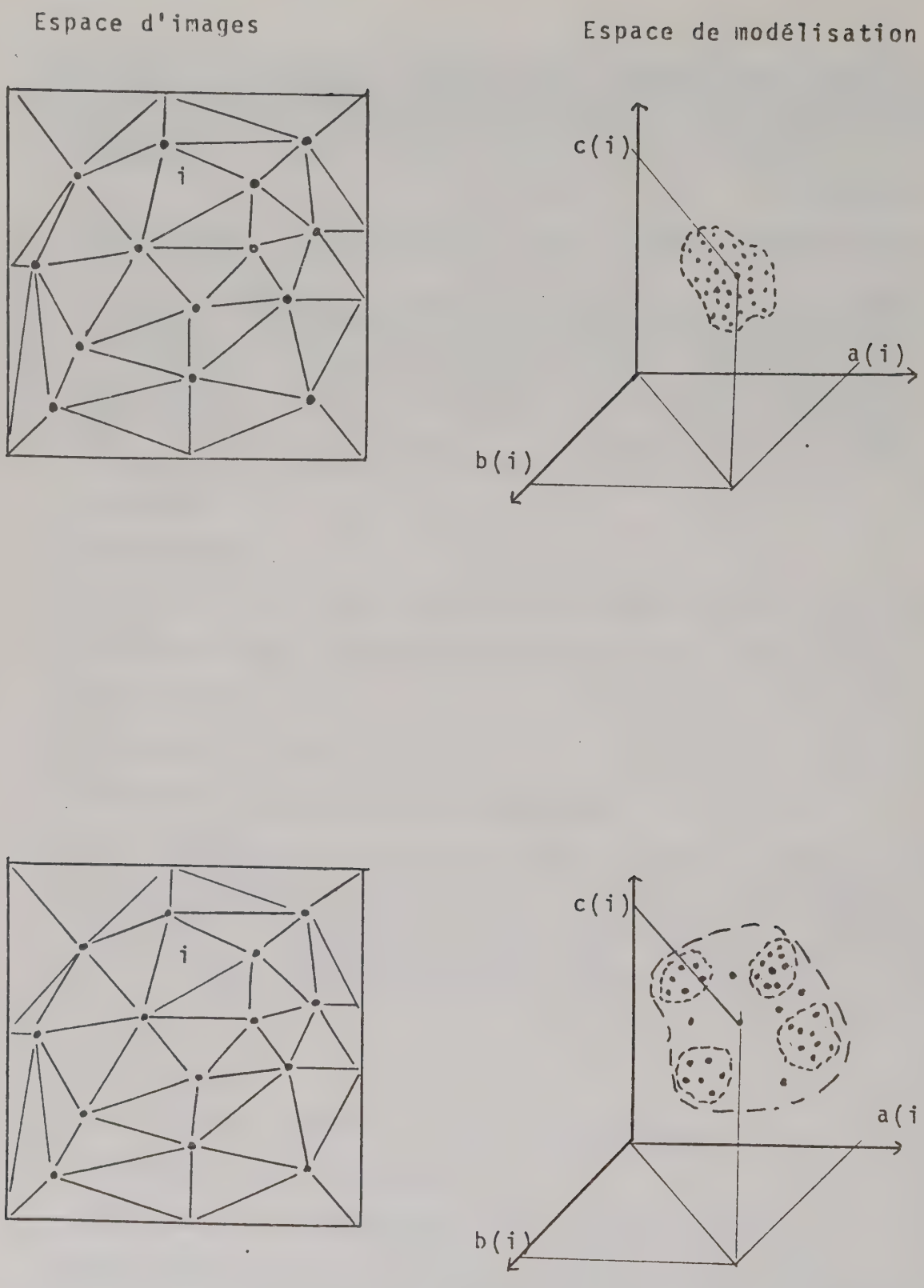


Figure 13. Diagramme de Voronoï et aggrégation dans l'espace de modélisation dans le cas a) d'une image peu déformée b) d'une image très déformée.

c. Modéle élastique de déformation: Modélisation optimale

[6] , [15], [16] , [34], [93]

1) Présentation du modèle.

Nous venons de décrire plusieurs modèles régionaux, l'inconvénient majeur commun à ces différents modèles est le découpage artificiel en régions de l'image qu'ils nécessitent et qui fait apparaitre des frontières, lieux de discontinuités des différents modèles de déformation; Malgré la mise en oeuvre d'algorithmes sophistiqués de mosaïque, il y a de grands risques de mauvais recalage à ces frontières.

L'idée principale de cette dernière méthode est de ne pas définir analytiquement le modèle de déformation entre l'image d'entrée et l'image de référence, de manière à lui rendre la liberté de fluctuation permettant une superposition optimale des deux images sans les subdiviser en régions.

Le principe est de considerer que les deux images à recaler sont constituées d'un matériau élastique qu'il s'agit de déformer jusqu'à ce qu'elles soient superposables.

L'image d'entrée, soumise à un ensemble de forces internes et externes, se déformera jusqu'à atteindre un état d'équilibre pour lequel une fonction de coût de déformation sera minimale (minimum local d'énergie du système).

L'état d'équilibre de notre système est atteint lorsque la résultante des forces internes et des forces externes est nulle.

On peut distinguer deux types de recalage en fonction des termes intervenant dans cette fonction de coût:.

1) Le recalage plastique pour lequel la fonction de coût ne comprend qu'un terme de similarité. Chaque point de l'image de référence correspond alors à un point unique de l'image à recaler indépendamment du degré de distorsion entre les deux images. Ceci suppose que l'image est constituée d'un matériau totalement plastique tolérant des déformations maximum.

2) Le recalage élastique pour lequel la fonction de coût comprend un terme de similarité et un terme de déformation:

COUT = DEFORMATION - SIMILARITE

La superposition optimale correspond alors au minimun de cette fonction soit à la plus faible valeur de déformation et à la plus grande valeur de similarité.

On procédera successivement à ces deux types de recalage; le premier pour corriger globalement l'image d'entrée par rapport à l'image de référence et le second pour affiner la correction localement.

Cette méthode a été employée avec succès sur des images synthétiques et sur des images médicales 3D; il s'agit d'images beaucoup moins texturées que les images de télédétection et dont les déformations sont moins importantes. Notre propos, dans ce paragraphe, est de présenter cette méthode en l'adaptant au cas des images de télédétection.

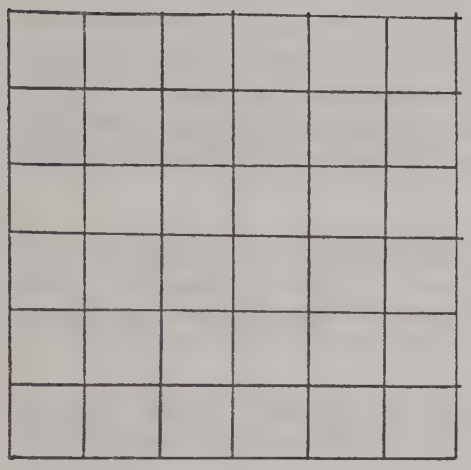
Les forces externes dérivent d'un potentiel scalaire mesurant la similarité locale entre les deux images,

les forces internes sont représentées par des fonctions linéaires de la déformation.

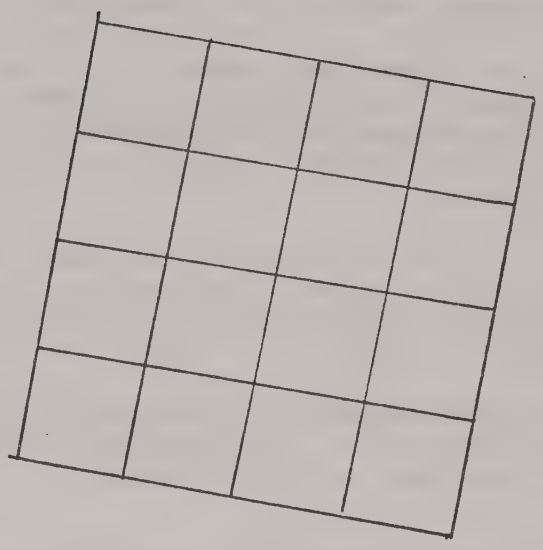
La résolution d'un ensemble d'équations aux dérivées partielles (théorie linéaire d'élasticité) aux noeuds d'une grille équi-répartie sur l'image détermine la position optimale de la grille déformée sur l'image d'entrée. Les dérivées partielles sont approximées par différences finies sur les noeuds de la grille et les équations sont résolues par itérations succéssives. [43] .

Cette grille étant un paramètre d'entrée de l'algorithme de ré-échantillonnage développé, cette méthode ne remet pas en cause les techniques de ré-échantillonnage et ne demande aucun traitement supplémentaire sur l'image de sortie, ce qui représente un grand avantage sur les autres méthodes.

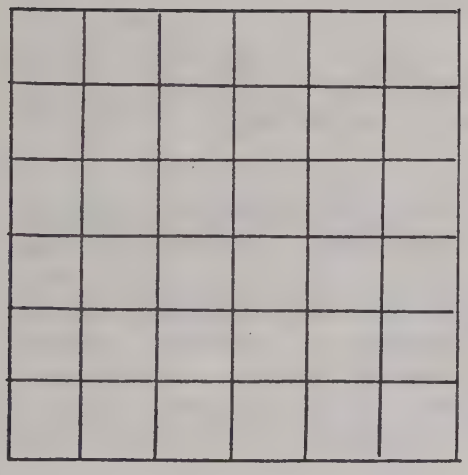
Les forces internes mesurent la rigidité même des images à traiter (leur cohésion) elles mesurent essentiellement la stabilité des paramètres de vol de la plateforme du capteur. Il est clair que ces forces sont plus intenses dans le cas d'images Landsat MSS où la cohérence relative entre deux images est grande que dans le cas d'images prises de capteurs aéroportés tels que DAEDALUS pour lesquels les différences entre deux images, dues à l'instabilité de l'avion, sont très importantes. La figure 14 de la page 83 montre les grilles de déformation dans ces deux cas.



Grille de référence



Grille déformée



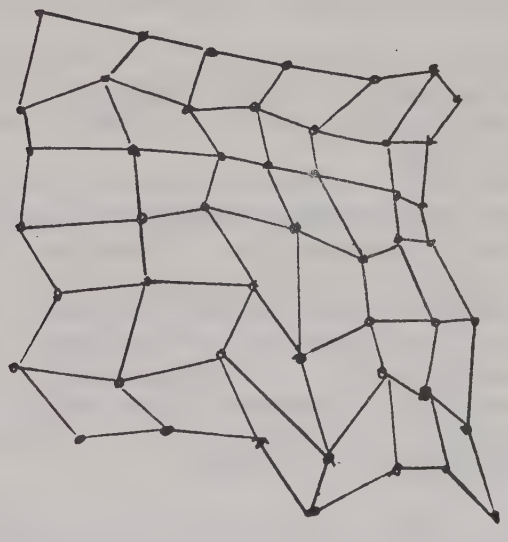


Figure 14. grilles de déformation: a) image de forte rigidité interne, b) image de faible rigidité interne.

2) Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont primordiales dès que l'on veut résoudre un problème d'élasticité.

Deux cas peuvent se produire:

1) Le problème consiste à déterminer la déformation de l'objet (distribution des déplacements des points de l'objet), connaissant la distribution des forces extérieures en tout point de l'objet et la position de sa surface (Problème de Dirichlet)

2) Il s'agit du même problème mais cette fois la position de la surface n'est pas connue, par contre la distribution des forces à la surface de l'objet est donnée. (Problème de Neumann)

Nous choisissons de résoudre le premier problème pour notre application en donnant aux limites de l'image la position estimée par un modèle global.

Principe de Saint Venant; Différence conceptuelle avec la méthode globale des moindres carrés

Ce principe affirme que si différentes distributions d'efforts sur une partie d'un objet sont équivalentes statistiquement (c'est à dire si elles ont même force résultante et même moment résultant), alors elles ont approximativement le même effet sur l'état des contraintes sur toute autre partie de l'objet éloignée de la première.

Ceci implique que si les limites de l'image à déformer sont placées loin de la région qui nous interesse, la distribution des forces sur ces frontières aura peu d'effet sur la région étudiée.

Ceci sous-entend que ce modèle prend en compte principalement les déformations locales dans un voisinage restreint de l'image. Ce principe est fondamental dans la modélisation des déformations haute-fréquences des images de part le fait même que de fortes variations de la déformation seront alors modélisées correctement si les régions qu'elles affectent sont suffisamment éloignées sur l'image. (La distance minimale de ces régions dépend de la constante d'élasticité associée à l'image).

La méthode globale de minimisation de la distance locale résiduelle entre les images au sens des moindres carrés contredit totalement ce principe: en effet tous les points de

contrôle utilisés dans l'estimation du modèle interviennent à part égale quelle que soit leur position relative ce qui signifie que l'influence mutuelle de points de contrôle éloignés sur l'image est décisive dans la modélisation. Cette remarque explique la difficulté de modéliser par la méthode des moindres carrées la déformation entre deux images de scanners aéroportés pour lesquelles les déformations entre les différentes régions (dans le sens de la trace) ne sont pas du toùt corrélées. Nous en avons fait l'expérience sur des images de simulations SPOT de la région parisienne pour des vols de 1981 et de 1983.

3) Equations d'équilibre

Nous allons maintenant exprimer les équations aux dérivées partielles qui régissent l'équilibre de notre système.

Il s'agit d'écrire qu'à l'état d'équilibre la résultante des forces internes et externes est nulle:

$$f(i) + f(e) = 0$$

Reste à exprimer ces deux termes.

Nous supposerons que les images sont constituées d'un matériau élastique et forment un volume dont l'épaisseur est extrêmement faible et ne varie pas au cours de la déformation. Nous écrirons les équations d'équilibre en 3 dimensions.

Soit (X,Y,Z) les coordonnées d'un point dans la géométrie de référence.

Soit (U,V,W) les coordonnées de ce même point dans la géométrie d'entrée.

La somme des forces internes est donnée par l'intégrale de la composante normale des efforts sur la surface d'une petite région autour d'un point.

En appliquant le théorème de Gauss, on obtient:

$$\int_S S_n \, ds = \int_V \operatorname{div} S \, dv$$

Où S est le tenseur des efforts appliqués sur cette région.

On obtient donc l'équation :

$$F(e)_i + \sum_j \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad \text{pour} \quad i = 1, 2, 3$$

En faisant l'hypothèse que l'image est faite d'un matériau isotrope et homogène, il ne reste plus que deux constantes indépendantes dans l'équation ci-dessus.

$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}$ Module d'Young

SIGMA $= \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$ Coefficient de Poisson

où λ et μ sont les constantes élastiques de Lame

LAMBDA > 0

En remplacant le tenseur des efforts par sa valeur en fonction des contraintes (fonctions linéaires des efforts: loi de Hooke), on obtient:

$$\mu \nabla^2 u + (\mu+\lambda) \frac{\partial \theta}{\partial x} + F(e)_x = 0$$

$$\mu \nabla^2 V + (\mu+\lambda) \frac{\partial \theta}{\partial y} + F(e)_y = 0$$

$$\mu \nabla^2 W + (\mu+\lambda) \frac{\partial \theta}{\partial z} + F(e)_z = 0$$

Il s'agit des équations de Navier. THETA représente le changement de volume entre l'état de référence et l'état d'entrée.

$$\theta = \frac{dv' - dv}{dv} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

En fait la solution de nombreux problèmes d'élasticité est quasi-indépendante de la valeur de la constante de Poisson.

On choisit communement E=0 ou 1/4

Le système d'équations différentielles est résolu aux noeuds d'une grille de déformation posée sur l'image de sortie, par la méthode des éléments finis. On obtient ainsi la grille de déformation sur l'image d'entrée. Les points intérieurs à une maille de la grille sont positionnés par interpolation bilinéaire.

Prenons le cas de la première équation: il faut approximer

$$\nabla^2 u \ , \ \frac{\partial \theta}{\partial x} \ , \ F(e)$$

par les différences finies sur les noeuds de la grille posée sur l'image d'entrée.

Soit h le pas de la grille, nous le normaliserons à 1.

Les coordonnées d'un noeud de la grille (i,j,k) sont repérées par U(i,j,k), V(i,j,k), W(i,j,k) dans la géométrie d'entrée

$$\nabla^2 u = u(i+1,j,k) + u(i-1,j,k) + u(i,j+1,k) + u(i,j-1,k) + u(i,j,k+1) + u(i,j,k-1) - 6u(i,j,k)$$

$$\theta = u(i+1,j,k) - u(i-1,j,k) + v(i,j+1,k) - v(i,j-1,k) + w(i,j,k+1) - w(i,j,k-1)$$

4) les forces externes

Il se pose deux problèmes:

D'une part, ces forces ne peuvent pas s'écrire de façon analytique.

D'autre part, dans ce modèle, les forces externes dépendent à la fois de (X,Y,Z) coordonnées d'un point dans l'image de référence et de (U,V,W) coordonnées d'un point de l'image d'entrée puisqu'elles dérivent d'une fonction potentielle donnée par la similarité locale entre les deux images.

Soit il s'agit d'un recalage multi-temporel d'images provenant d'une même source; la similarité entre les deux images peut alors être mesurée aux noeuds de la grille par la fonction de cross-corrélation.

Soit il s'agit d'un recalage d'images provenant de sources différentes. La fonction de cross-corrélation n'est plus assez efficace dans ce cas et de plus les déformations sont alors trop importantes pour être corrigées directement par cette méthode. La fonction de similarité dérivera alors du couple de polynômes (horizontal et vertical) approximant globalement la déformation entre les deux images.

Dans le premier cas, on utilise le modèle d'élasticité de Lagrange pour lequel en chaque point les forces externes sont fonction de la position de ce point à l'état déformé.

$$F(c)_x = \frac{\partial c(i,j,k,u(x,y,z),v(x,y,z),w(x,y,z))}{\partial x}$$

$$= \frac{\partial c}{\partial u}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial v}\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial w}\frac{\partial w}{\partial x}$$

La méthode consiste à approximer la surface de cross-corrélation autour de chaque noeud par une fonction polynomiale en utilisant la méthode des moindres carrés, à exprimer les dérivées partielles en ces points et à les reporter dans l'expression de F ainsi que les dérivées partielles de U,V,W, exprimées par différences finies.

Dans le second cas, la fonction coût à minimiser est la suivante:

COUT = DEFORMATION + ERREUR**2

Les forces externes dérivent d'un potentiel scalaire mesurant l'erreur de recalage par une modélisation globale. Soient P,Q,R les polynômes approximant au mieux la déformation globale entre les deux images (en trois dimensions), l'erreur de recalage peut être estimée à l'aide de points de contrôle et de points tests par l'expression:

$$RMS = \sum_{i=1}^{m} Res(i) = \sum_{i=1}^{m} \left((u_i - P(x_i, y_i, z_i))^2 \right.$$

$$\left. + (v_i - Q(x_i, y_i, z_i))^2 + (w_i - R(x_i, y_i, z_i))^2 \right)$$

Les résidus RES sont alors estimés par interpolation en chaque noeud de la grille. La grille de déformation est calculée sur l'image d'entrée à l'aide du modèle global. On peut alors exprimer les forces externes par une expression similaire à la précédente:

$$F(e)_x = \frac{\partial Res}{\partial u}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial Res}{\partial v}\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial Res}{\partial w}\frac{\partial w}{\partial x}$$

5) Conclusions

Nous avons exprimé tous les termes constituant le système d'équations d'équilibre régissant la déformation à modéliser. Nous sommes donc en mesure de résoudre ce système. Il est clair que ce système d'équations ne peut pas être résolu directement, la taille de la grille étant trop importante (minimum 100x100). Il est donc nécessaire d'employer des méthodes itératives de résolution.

Ces méthodes n'ont malheureusement pas été programmées faute de temps.

Nous terminerons ce chapitre en remarquant que cette méthode est celle qui est la plus indépendante des points de contrôle. Elle est optimale au sens où elle permet une correction des déformations très locales sans introduire d'artifices dans l'image de sortie. D'autre part elle ne remet pas en cause les méthodes classiques de

ré-échantillonnage, puisqu'elle crée une grille de déformation, paramètre de l'algorithme de ré-échantillonnage.

De plus, ayant fourni de bons résultats sur des images synthétiques et sur des images médicales à faible texture, tout porte à penser qu'elle donnera de très bons résultats sur des images de télédétection.

QUATRIEME CHAPITRE

DESCRIPTION DE L'ALGORITHME DE RECALAGE IMPLANTE.

Le programme de recalage d'images que nous avons développé au centre scientifique IBM-France s'insère dans un logiciel de traitement d'images IBM (IPS/7350 SOFTWARE) qui comprend la plupart des opérations classiques de traitement d'images et certains algorithmes plus spécifiques à la télédétection Ce logiciel tourne en partie sur le calculateur hôte (IBM 3031) et en partie sur un processeur spécialisé de traitement d'images (IBM 7350).

1. ARCHITECTURE MATERIELLE

[75] , [40]

Le schéma figure 15 de la page 94 représente l'architecture complète du système: il est constitué par:

- le processeur spécialisé

- le contrôleur permettant le dialogue avec l'ordinateur hôte.

- un écran image haute résolution 1024x1024

- un "joystick" activant un curseur ou une fenêtre sur l'écran image

- un écran conversationnel muni d'un clavier alphanumérique et de touches fonction-image.

Le processeur est lui-même constitué de six mémoires d'images de 1024x1024x8 bits chacune.

A chaque mémoire d'images est associée une table de couleur permettant le transfert des images d'un format 8 bits à un format 16 bits par pels en vue de traitement dans le processeur local.

L'unité arithmétique et logique permet de faire des opérations simples (addition, multiplication, rapport ....) sur les images situées dans les mémoires locales.

Une table de couleur CLUT en sortie de l'unité arithmétique et logique assure le retour vers les mémoires d'images ou la mémoire de visualisation.

Un interpolateur assure les opérations de dilatation ou de réduction localement, donc très rapidement. Une fonction histogramme est également cablée.

Le schéma figure 16 de la page 95 indique les flots possibles de données à travers les différentes fonctions du processeur local.

La mémoire de visualisation est constituée de 12 plans de 1024x1024 bits plus un plan d'"overlay" utilisé pour les sur-impressions alphanumériques ou vectorielles sur l'image.

Une table de pseudo-couleur permet de transcoder les couleurs avant la visualisation.

Enfin trois convertisseurs numérique-analogique transfèrent l'information au moniteur couleur.

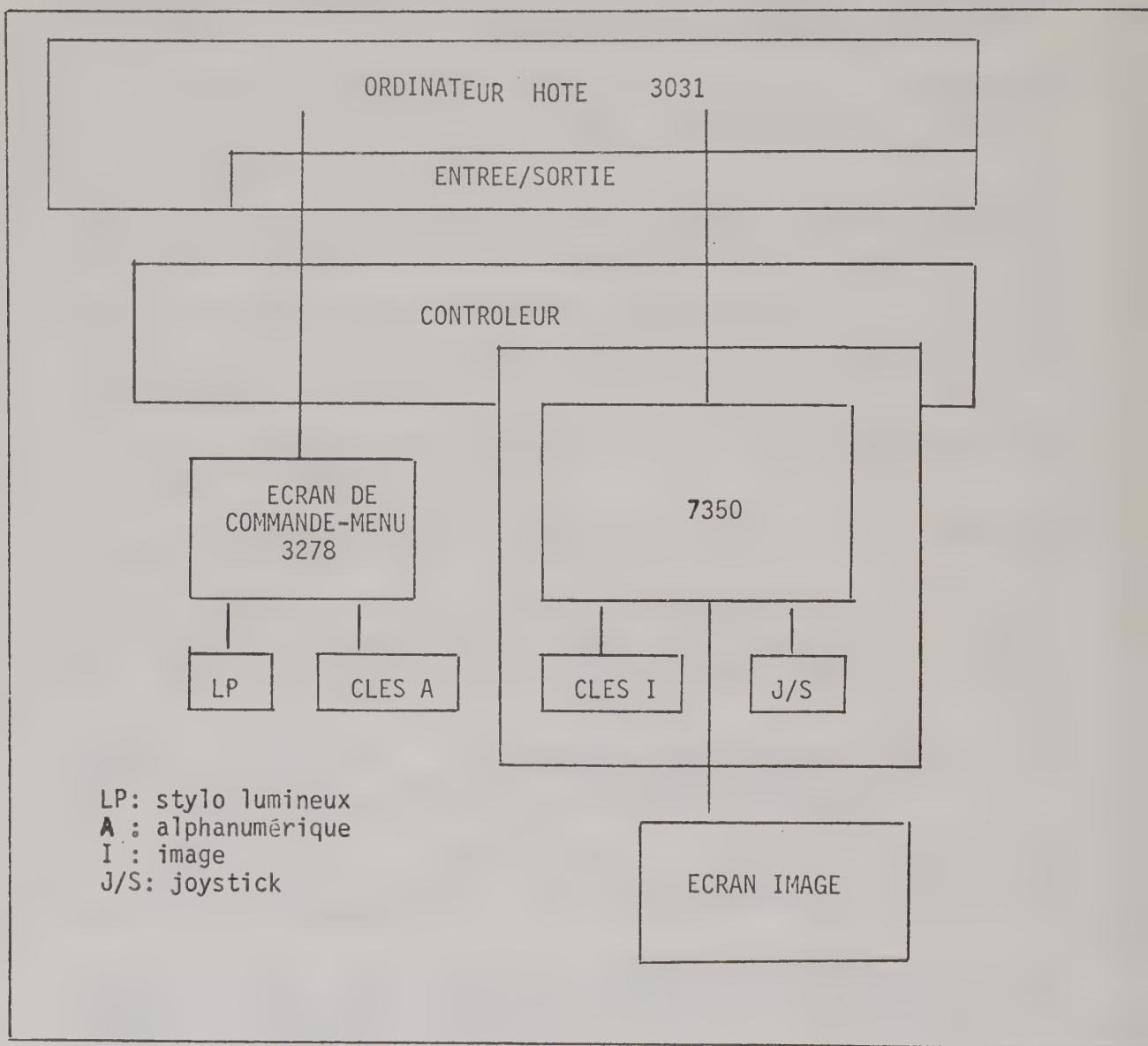


Figure 15. Architecture du processeur spécialisé de traitement d'images IBM 7350

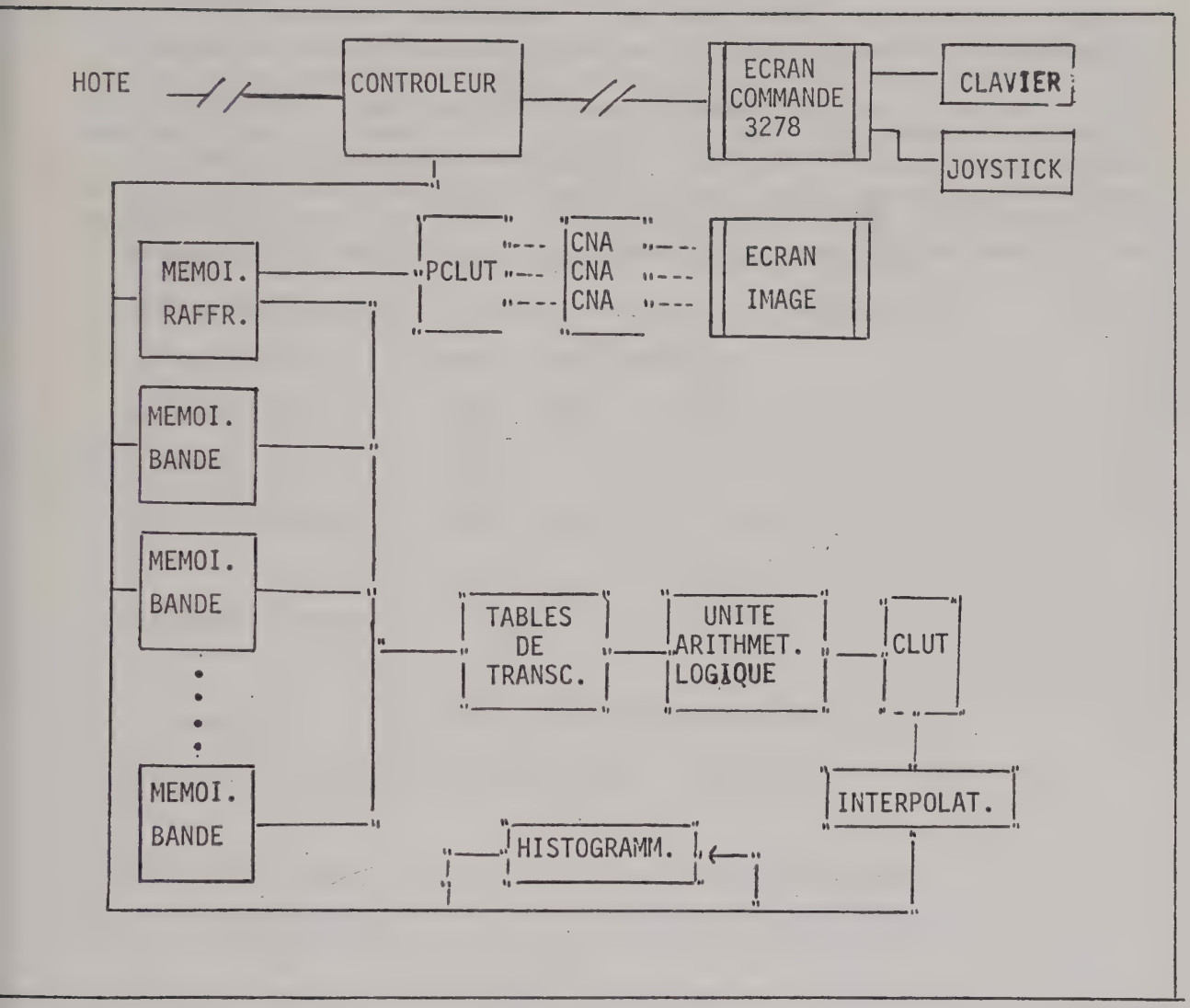


Figure 16. Flot des données à travers les différentes fonctions du processeur local

2. ORGANISATION LOGICIELLE

[50]

Le logiciel de traitement d'images (IPS/7350) est organisé de façon hiérarchique. Le dialogue utilisateur est assuré par l'intermédiaire d'un ensemble de menus formant une arborescence. Ces menus permettent à l'utilisateur de choisir les algorithmes nécessaires à son application , de saisir les paramètres ou de visualiser certains résultats numériques ou certains messages indiquant le bon déroulement du programme.

C'est un système modulaire qui comprend environ 300 programmes. Le menu principal de IPS/7350 représenté figure 17 de la page 97 montre l'ensemble des opérations possibles. L'utilisateur, en choisissant une des options, s'engage dans l'une des branches de l'arborescence. De même, chaque option possède son menu principal: inventaire de tous les traitements spécifiques dans cette option, puis on atteint les menus spécifiques de chaque application. on peut voir figure 18 de la page 98 le menu principal de l'algorithme de recalage.

```
MA000000 ---------- HIPS PRIMARY MENU ----------

   SELECT ONE OF THE FOLLOWING OPTIONS ==>

    0. PARMS ..... SET SYSTEM PARAMETERS AND DIAGNOSTIC AIDS
    1. TAPE I/O ..... READ OR WRITE IMAGES FROM TAPE TO DISK
    2. LOAD/UNLOAD..... LOAD OR UNLOAD 7350 IPS BUFFERS WITH IMAGE DATA
    3. PARTITIONS ..... DEFINE PARTITIONS OF THE DISPLAY SCREEN
    4. DISPLAY ..... DISPLAY IMAGES ON THE SCREEN
    5. TABLES ..... MODIFY TRANSLATE TABLES OF DISPLAYED IMAGES
    6. MANIPULATE ..... MANIPULATE LOCAL IMAGES
    7. PLOTS ..... PRESENT PLOTS AND DATA DISPLAYS
    8. GRAPHICS ..... DEFINE AND DISPLAY GRAPHIC DATA
    9. FIELDS ..... DEFINE OR MODIFY FIELDS (POLYGONS)
   10. CLASSIFICATION .. PERFORM MULTISPECTRAL CLASSIFICATION
   11. REGISTRATION .... CHANGE IMAGE GEOMETRY
   12. DISK-TO-DISK .... CREATE IMAGES DISK-TO-DISK
   13. REPORTS ..... PRESENT REPORTS OF HIPS FILES
   14. USER PROGRAM .... CALL A USER PROGRAM FROM WITHIN HIPS

   TERMINATE OPTIONS:

     T. TERMINATE ..... EXIT HIPS AND RETURN TO CMS
     K. TERMINATE/KEEP... EXIT HIPS BUT DO NOT ERASE THE RESTART FILE

   PF4 = CLEAR SCREEN                    PF6 = CLEAR REFRESH
   PF7 = CLEAR OVERLAY                   PF8 = CHANGE PARTITIONS
```

Figure 17. Menu principal du logiciel de traitement d'images IBM IPS/7350

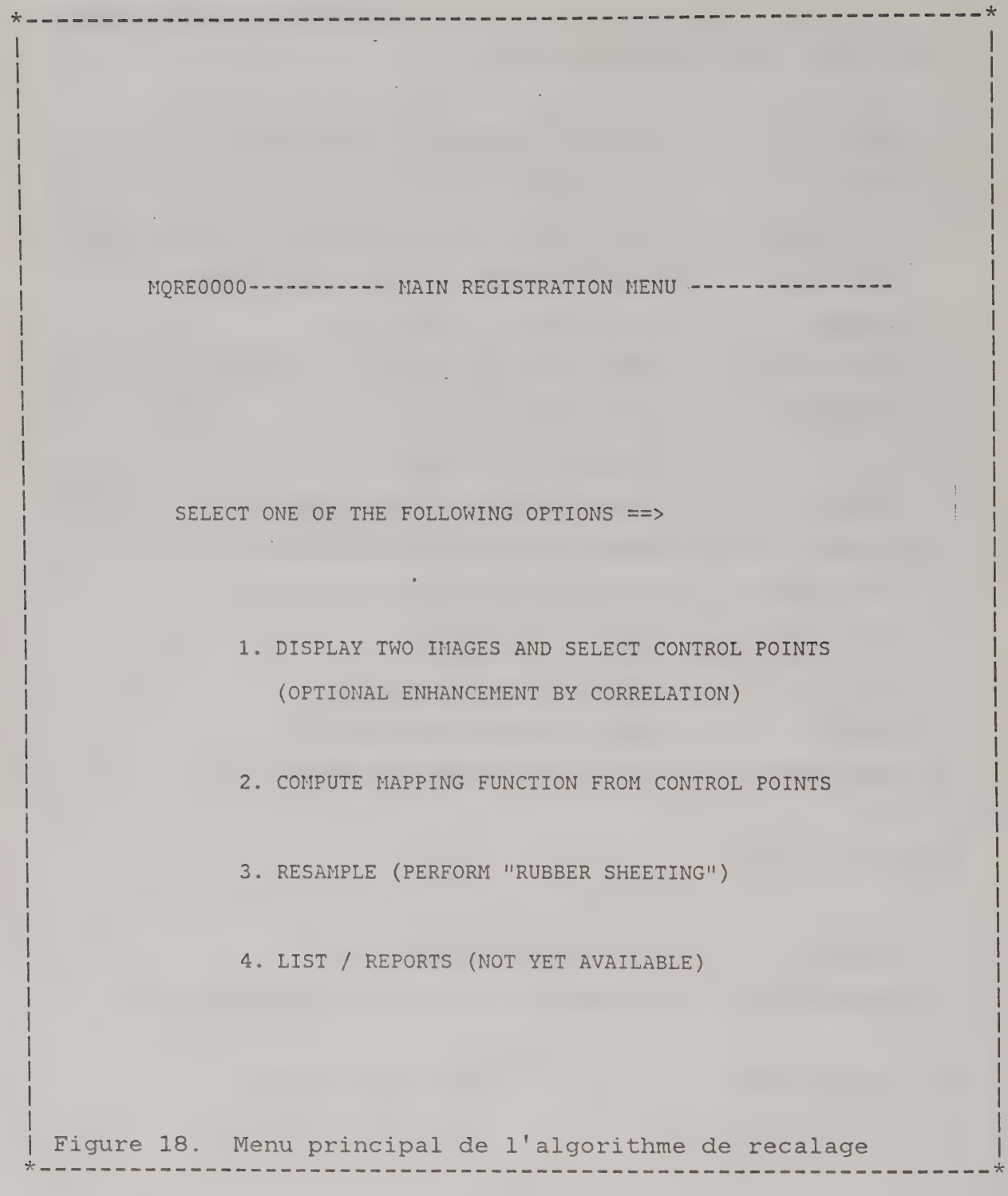


Figure 18. Menu principal de l'algorithme de recalage

3. ALGORITHME DE RECALAGE

L'algorithme de recalage constitue donc l'une des arborescences du logiciel IPS/7350.

L'architecture générale de cet algorithme suit les différentes étapes détaillées dans le premier chapitre. Les tests étant insérés dans le bloc à la fin duquel ils interviennent.

Le schéma bloc figure 19 de la page 100 présente en effet les trois blocs fonction-recalage:

-points de contrôle APPRENTISSAGE

-modèle de déformation OPERATEUR DE RECONNAISSANCE

-ré-échantillonnage IDENTIFICATION

et un quatrième bloc de rapport:

Ce bloc permet d'accéder à des fichiers pour les visualiser ou même les modifier, ce que l'utilisateur ne peut pas faire s'il suit le déroulement de l'algorithme. Ce peut être le fichier de points de contrôle, le fichier de modèle ou le fichier de grille.

Les trois paragraphes suivants décrivent les trois blocs fonction-recalage.

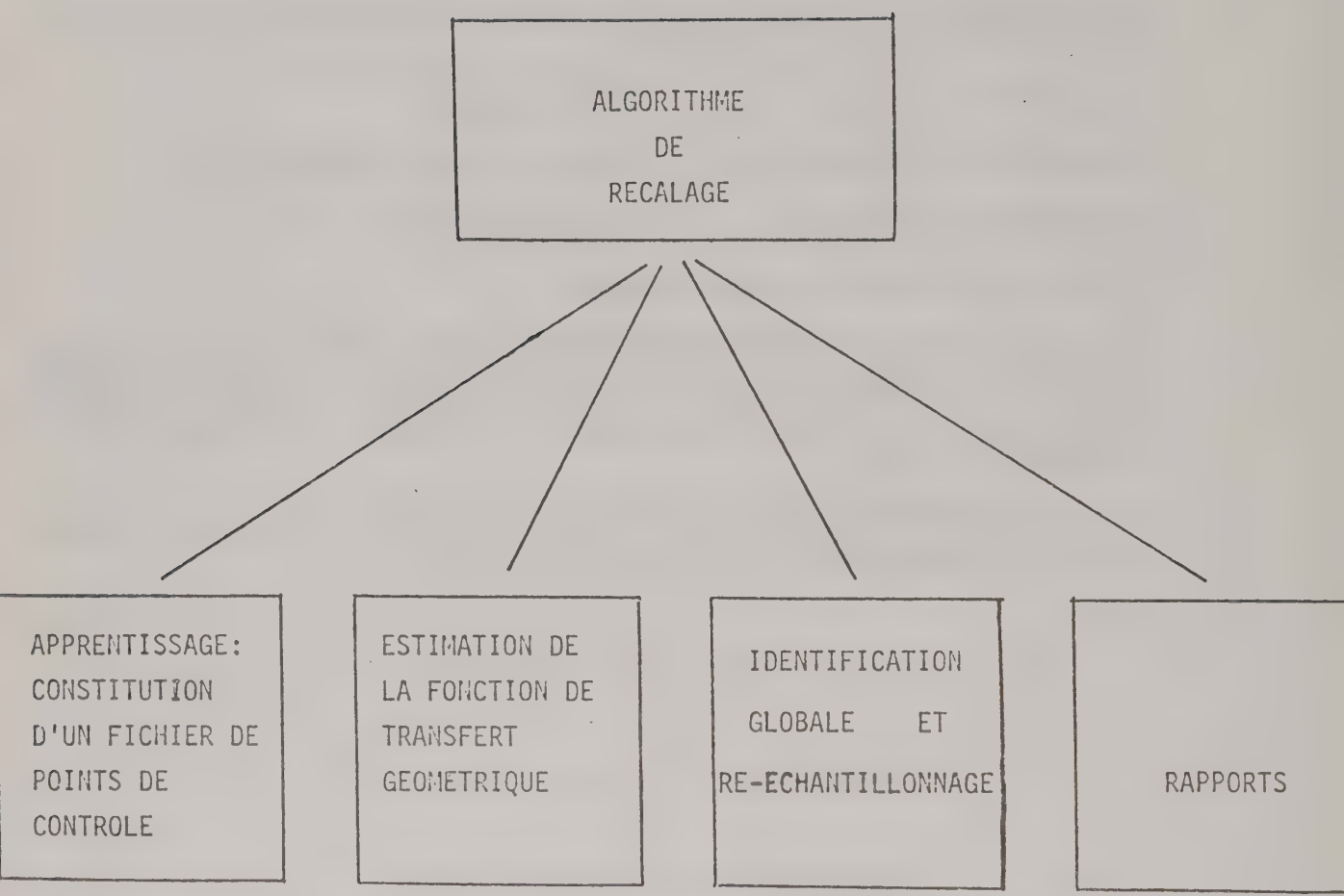


Figure 19. Schéma bloc de l'algorithme de recalage

a. module d'apprentissage: Constitution d'un fichier de points de contrôle

Ce module comprend:

a) un prétraitement facultatif des images de référence et d'entrée (amélioration de contraste, filtrage, codage, etc ...)

b) la visualisation des deux images cote à cote sur l'écran 7350

c) la sélection visuelle des points de contrôle (premier niveau)

d) une mise en coïncidence locale (second niveau) avec recherche du maximum de corrélation au pel près et prétraitement géométrique si nécessaire.

e) la création d'un fichier de points de contrôle

L'écran 7350 a une résolution de 1024x1024 points, nous ne pouvons donc visualiser en même temps sur l'écran que deux sous-images de 512x1024.

Nous travaillerons donc sous-image après sous-image jusqu'à ce que nous ayons couvert l'image entière.

Le menu de visualisation permet la sélection des images de référence et d'entrée ainsi que les coordonnées du premier point des sous-images à visualiser et leur table de couleur associée.

A la suite de cette opération, les sous-images sont visualisées sur l'écran 7350; l'image de référence étant à gauche (voir figure 22 de la page 105).

On procède ensuite à la sélection de points de contrôle proprement dite.

Le menu figure 20 de la page 103 permet à l'utilisateur la sélection de tous les paramètres nécessaires. L'option REPLACE permet l'insertion de nouveaux points de contrôle dans un fichier déjà existant:

REPLACE = YES l'ancien fichier est remplacé.

REPLACE = NO l'ancien fichier est mis à jour.

Le menu suivant permet à l'utilisateur de vérifier les coordonnées des points de contrôle qu'il prend sur l'écran à l'aide d'un "joystick" et d'associer un commentaire à chaque point s'il le souhaite (figure 21 de la page 104).

Dès qu'un point est sélectionné sur les images, il est repéré par un petit losange (figure 22 de la page 105).

La sélection des points de contrôle peut être facilitée par une opération de zoom "hardware" par 2, 4 ou 8.

```
MQRE1001---------- MAIN CONTROL POINT MENU ----------------


  RUN IDENTIFICATION ==>              $POINT SET NAME ==>


  IF THE ABOVE FILE EXISTS, DO YOU WANT
                                 TO ADD POINTS TO IT? ==>
  (OTHERWISE THE EXISTING FILE WILL BE
           ERASED AND YOU START AGAIN.)


  CORRELATION TO ACCURATELY LOCATE CONTROL POINTS
                                                 (Y OR N) ==>
  RESAMPLING OF SEARCH AREA BEFORE CORRELATION
                                                 (Y OR N) ==>
```

Figure 20. Menu de sélection des options disponibles pour le relevé des points de contrôle

MQRE1004------ FIND CONTROL POINTS FROM JOYSTICK -----------

RUN IDENTIFICATION ==> POINT SET NAME ==>

PRESS ENTERKEY TO BEGIN JOYSTICK INPUT

PF6 TO MODIFY THE DISPLAY

NEXT POINT TO LOCATE==>

	LEFT SCREEN		RIGHT SCREEN		
PTS	LINE	PIXEL	LINE	PIXEL	COMMENTS
"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"
"	"	"	"	"	"

Figure 21. Menu de visualisation des coordonnées des points de contrôle relevés

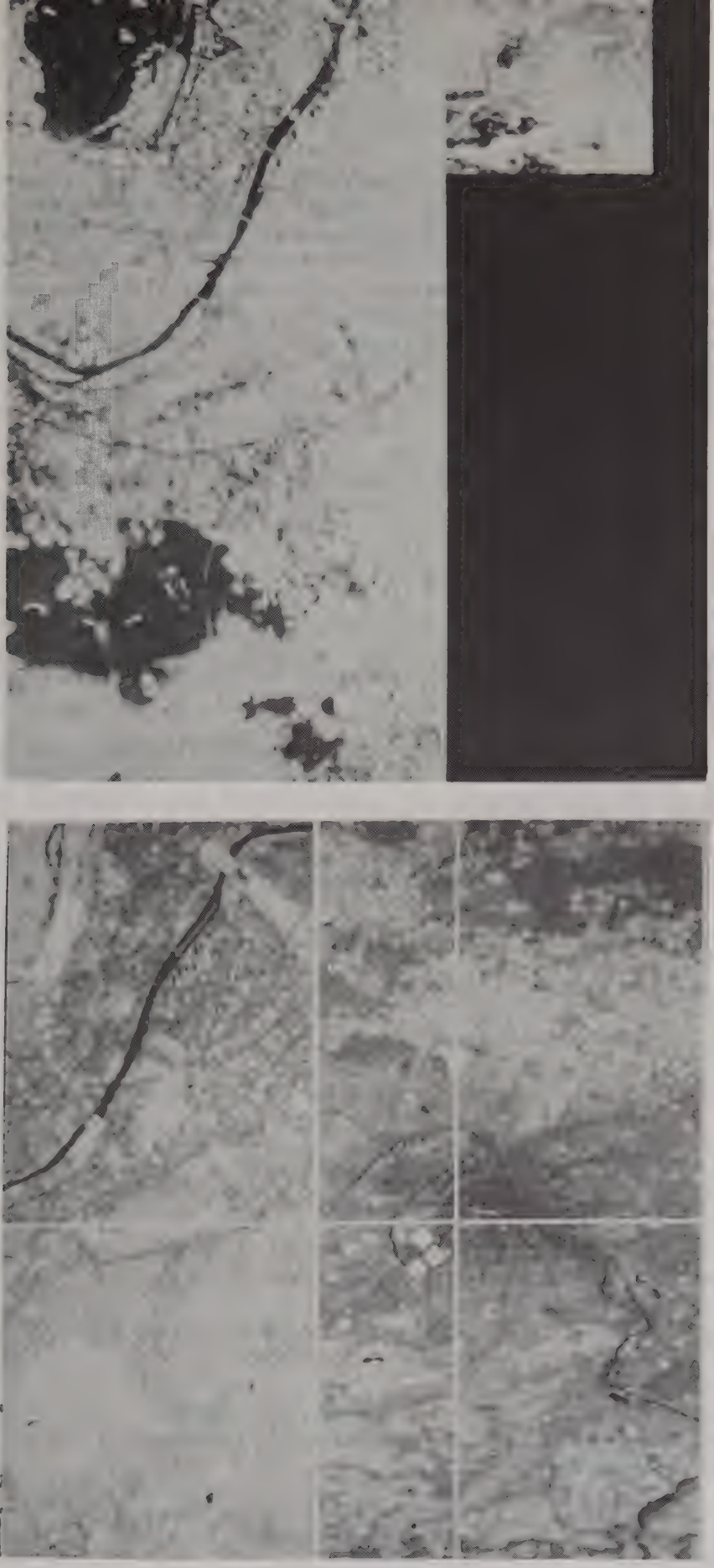


Figure 22. En haut: visualisation de l'image de référence à gauche et de l'image à recaler à droite. En bas: points de contrôle repérés par des losanges

Le fichier de points de contrôle est principalement constitué des coordonnées-image (c'est à dire dans le système des coordonnées de l'image entière sur la bande magnétique).

Nous avons choisi de ne pas sauvegarder les imagettes entourant chaque point de contrôle; en effet, ceci n'est vraiment efficace que si le problème est de recaler un grand nombre d'images par rapport à une même image, il est alors intéressant d'éviter la recherche des imagettes autour des points de contrôle sur l'image de référence

En ce qui nous concerne, seules les coordonnées nous suffisent; de plus ceci permet un gain d'espace disque considérable.

Ce fichier comprend:

1) l'identification de l'utilisateur ainsi que la date de création du fichier

2) un enregistrement contenant éventuellement un commentaire

3) les noms des images de référence et d'entrée et le nombre de points de contrôle contenus dans le fichier.

4) pour chaque point de contrôle

- son numéro

- ses coordonnées ligne et colonne sur l'image de référence

- ses coordonnées ligne et colonne sur l'image d'entrée

- un commentaire éventuel

L'algorithme de prise de points de contrôle est détaillé figure 23 de la page 108

Nous allons maintenant décrire l'algorithme de mise en correspondance locale de deuxième niveau.

Cet algorithme reprend la méthode décrite chapitre 2; il comprend pour chaque point de contrôle :

1) l'extraction de la fenêtre centrée sur le point de contrôle sur l'image de référence (opération disque-disque ou mémoire-mémoire)

2) l'extraction de l'aire de recherche centrée sur le point de contrôle sélectionné visuellement sur l'image d'entrée (opération disque-disque ou mémoire-mémoire).

3) le ré-échantillonnage de l'aire de recherche si nécessaire (prétraitement géométrique). Un modèle de déformation linéaire ayant été estimé au préalable.

4) le calcul des coefficients de cross-corrélation

- balayage de la fenêtre sur l'aire de recherche

- calcul du coefficient

5) la recherche du maximum de corrélation

6) le transfert des coordonnées du maximum de corrélation dans l'espace d'entrée pour obtenir les coordonnées du point de contrôle dans l'image d'entrée.

L'utilisateur peut à la suite de cette recherche:

1) visualiser le point ainsi calculé sur l'image d'entrée

2) prendre en compte les nouvelles coordonnées de ce point

3) conserver les anciennes coordonnées du point au cas où l'opérateur de mise en coïncidence locale aurait échoué.

4) éliminer le point, en question, du fichier de points de contrôle

La figure 24 de la page 109 présente un exemple de fichier de points de contrôle

1. VISUALISATION (menu MQRE1000)

- Partition verticale de l'écran en 2
- Affichage de l'image de référence dans la partition de gauche
- Affichage de l'image à recaler dans la partition de droite

2. SAISIE DES PARAMETRES NECESSAIRES A LA PRISE DE POINTS DE CONTROLE (menu MQRE1001)

3. SI NON CORRELATION

- Relevé des coordonnées des points de contrôle sur l'écran à l'aide du "joystick" (menu MQRE1004 et MQRE1005)
- Sauvegarde du fichier de points de contrôle

4. SI CORRELATION ET NON RE-ECHANTILLONNAGE DE L'AIRE DE RECHERCHE

- Relevé des coordonnées des points de contrôle sur l'écran à l'aide du "joystick" (menu MQRE1004 et MQRE1005)
- Chargement de la fenêtre de référence et de l'aire de recherche
- Corrélation (menu MQRE0012)
- Sauvegarde du fichier de points de contrôle

5. SI CORRELATION ET RE-ECHANTILLONNAGE DE L'AIRE DE RECHERCHE

- Relevé des coordonnées des points de contrôle sur l'écran à l'aide du "joystick" (menu MQRE1004 et MQRE1005)
- Ré-échantillonnage de l'aire de recherche
- Chargement de la fenêtre de référence et de l'aire de recherche ré-échantillonée
- Corrélation (menu MQRE0012)
- Sauvegarde du fichier de points de contrôle

6. SI NON CORRELATION ET RE-ECHANTILLONNAGE

- Erreur signalée à l'utilisateur

Figure 23. Algorithme d'apprentissage: constitution d'un fichier de points de contrôle

FORTIN 83040135904

	VENTOU	LANDSAT	SEASAT	NUMBER OF CONTROL POINTS : 30	
1	821.00	703.00	554.00	327.00	
2	849.00	660.00	550.00	301.00	
3	913.00	682.00	618.00	276.00	
4	914.00	625.00	609.00	232.00	"
5	662.00	253.00	157.00	181.00	RHONE
6	687.00	226.00	164.00	153.00	"
7	721.00	231.00	203.00	135.00	"
8	768.00	203.00	232.00	91.00	"
9	734.00	255.00	228.00	139.00	"
10	462.00	459.00	86.00	417.00	SUZETTE
11	443.00	395.00	46.00	376.00	SUZETTE
12	460.00	433.00	68.00	406.00	"
13	700.00	279.00	207.00	173.00	RHONE
14	864.00	587.00	530.00	250.00	CARP
15	720.00	665.00	414.00	365.00	FLOTTE
16	688.00	668.00	379.00	379.00	FONVAUCL
17	685.00	654.00	368.00	366.00	"
18	701.00	678.00	397.00	381.00	"
19	717.00	718.00	457.00	401.00	GORDES
20	729.00	722.00	466.00	403.00	"
21	929.00	626.00	610.00	231.00	ALPILLES
22	980.00	463.00	589.00	111.00	"
23	927.00	640.00	626.00	236.00	SNCF
24	957.00	653.00	654.00	227.00	ORGON
25	971.00	574.00	630.00	190.00	"
26	405.00	667.00	136.00	555.00	BEDON
27	406.00	658.00	133.00	548.00	"
28	447.00	586.00	140.00	482.00	VACQUEYRA
29	410.00	612.00	111.00	518.00	"
30	370.00	657.00	98.00	553.00	

Figure 24. Exemple de fichier de points de contrôle

b. Module d'estimation de la fonction de transfert géométrique: opérateur de reconnaissance

L'algorithme développé reprend la méthode paramétrique globale présentée chapitre 3. Il s'agit donc d'évaluer les coefficients des monômes des deux polynômes P et Q représentant la fonction de transfert géométrique horizontale et verticale:

$$U=P(x,y)$$

$$v=Q(x,y)$$

Plusieurs types de polynômes sont disponibles:

- simples

- orthogonaux: (Tchebycheff, Laguerre, Legendre, L'Hermite)

Dans le cas de polynômes simples, l'utilisateur a le choix des monômes qu'il désire conserver. Ceci est utile dans le cas où il a une idée précise de la déformation entre les deux images.

Les menus présentés figure 25 des pages 107 à 109 permettent la sélection de tous les paramètres nécessaires au calcul des coéfficients des polynômes de déformation.

```
MQRE2000-- COMPUTE MAPPING FUNCTION FROM CONTROL POINTS ---

 RUN IDENTIFICATION ==>                POINT SET NAME ==>
 SELECT THE REGION OF THE FITTING==>
                 1.  GLOBAL
                 2.  LOCAL  (NOT YET AVAILABLE)

 SELECT THE TYPE OF POLYNOMIALS TO USE==>
                 P.  MONIC (1, X, X , X , ...)
                 T.  TCHEBISCHEFF
                 L.  LAGUERRE
                 H.  HERMITE
                 N.  LEGENDRE

 SELECT THE ORDER OF THE FITTING POLYNOMIALS
 (NUMERIC VALUE):
                HORIZONTAL POLYNOMIAL ==>
                VERTICAL POLYNOMIAL   ==>
 WILL YOU SELECT THE POLYNOMIAL TERMS TO USE?==>  (Y OR N)
```

MQRE2001------ PATTERN OF HORIZONTAL POLYNOMIAL ----------

P IS A POLYNOMIAL FUNCTION OF H AND K

H : PIXEL IN THE REFERENCE IMAGE

P : PIXEL IN THE IMAGE TO REGISTER

K : LINE IN THE REFERENCE IMAGE

L : LINE IN THE IMAGE TO REGISTER

SELECT THE MONOMIAL YOU NEED FOR THE
POLYNOMIAL FITTING (Y OR N)

	1	H**1	H**2	H**3	H**4	H**5	H**6	H**7	H**8
1	y	y	n	n	n	n	n	n	n
K**1	y	n	n	n	n	n	n	n	
K**2	n	n	n	n	n	n	n		
K**3	n	n	n	n	n	n			
K**4	n	n	n	n	n				
K**5	n	n	n	n					
K**6	n	n	n						
K**7	n	n							
K**8	n								

MQRE2002------ PATTERN OF VERTICAL POLYNOMIAL ----------

L IS A POLYNOMIAL FUNCTION OF H AND K

H : PIXEL IN THE REFERENCE IMAGE

P : PIXEL IN THE IMAGE TO REGISTER

K : LINE IN THE REFERENCE IMAGE

L : LINE IN THE IMAGE TO REGISTER

SELECT THE MONOMIAL YOU NEED FOR THE

POLYNOMIAL FITTING (Y OR N)

	1	H**1	H**2	H**3	H**4	H**5	H**6	H**7	H**8
1	y	y	n	n	n	n	n	n	n
K**1	y	n	n	n	n	n	n	n	
K**2	n	n	n	n	n	n	n		
K**3	n	n	n	n	n	n			
k**4	n	n	n	n	n				
k**5	n	n	n	n					
K**6	n	n	n						
K**7	n	n							
K**8	n								

Figure 25. Menus de saisie des paramètres nécessaires au calcul du modèle de déformation horizontal et vertical.

L'ordre des polynômes peut varier entre 0 et 8, ce qui permet l'estimation de la fonction de transfert géométrique de façon très précise.

Il s'agit ensuite de sélectionner les points de contrôle intervenant dans l'algorithme des moindres carrés: c'est l'objet du menu présenté figure 26 de la page 117

Ce menu visualise tous les points de contrôle du fichier choisi par l'utilisateur. A chacun de ces points est associé un drapeau "flag" initialisé à 'F'.

Ce drapeau peut prendre 3 valeurs :

- 'F' signifiant "utilisé pour l'estimation du modèle"

- 'N' signifiant "non utilisé"

- 'T' signifiant "utilisé comme point test"

De plus, à chaque point correspond trois types de résidus:

- "XRES" correspondant à $U-\hat{U}$

- "YRES" correspondant à $V-\hat{V}$

- "RMS" correspondant à SQRT (XRES**2 + YRES**2)

L'utilisateur commence par choisir les points de contrôle qu'il veut faire intervenir dans l'estimation des coefficients des polynômes horizontaux et verticaux ainsi que ceux qu'il considère comme points de test.

Une fois l'estimation des coefficients au sens des moindres carrés terminée, les résidus "XRES", "YRES", et "RMS" apparaissent sur le menu (figure 27 de la page 118), ce qui permet à l'utilisateur de ré-itérer ses choix si les résidus sont mauvais; et ce jusqu'à ce qu'ils soient satisfaisants. A ce moment seulement, les coefficients calculés sont sauvegardés dans un fichier de modélisation.

Le fichier de modélisation comprend:

1) l'identification de l'utilisateur et la date de création du fichier.

2) Un enregistrement comprennant un commentaire éventuel.

3) Le nom du fichier de points de contrôle correspondant

4) La nature des polynômes choisis.

5) L'ordre du polynôme horizontal

6) Une matrice représentant les coefficients du polynôme horizontal utilisés

7) Les coefficients non nuls du polynôme horizontal ordonnés ligne par ligne par rapport à la matrice:

Exemple:

1	2	3	n	.	.	.	n
4	5	n	.	.	.	.	.
6	n	.	.	.	.	.	.
n	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
n	.	.	.	.	.	.	n

1

2

3

4

5

6

8) L'ordre du polynôme vertical

9) Une matrice représentant les coefficients du polynôme vertical

7) Les coefficients du polynôme vertical ordonnés ligne par ligne par rapport à la matrice:

La figure 28 de la page 119 détaille l'algorithme correspondant à ce module. La figure 29 de la page 120 donne un exemple d'un tel fichier.

MQRE2003--- CONTROL POINT SELECTION FOR MAPPING ----------

RUN IDENTIFICATION ==> SPOT POINT SET NAME ==> CMSS

	REFERENCE		REGISTER					
PTS	LINE	PIXEL	LINE	PIXEL	XRES	YRES	RMS	FLAG
1	40.00	369.00	548.62	378.60	0.	0.	0.	F
2	510.00	91.00	613.87	333.43	0.	0.	0.	F
3	416.00	227.00	602.29	353.58	0.	0.	0.	F
4	777.00	267.00	641.94	368.74	0.	0.	0.	F
5	795.00	295.00	642.00	374.42	0.	0.	0.	F
6	886.00	125.00	658.64	344.46	0.	0.	0.	F
7	925.00	375.00	656.98	390.91	0.	0.	0.	F
8	795.00	104.00	648.42	339.17	0.	0.	0.	F
9	120.00	195.00	562.62	345.75	0.	0.	0.	F
10	597.00	148.00	625.29	348.38	0.	0.	0.	F

ENTER = CALCULATE COEFFICIENTS FLAG: F: FIT
T: TEST
N: DO NOTHING

Figure 26. Menu de selection des points de contrôle intervenant dans l'estimation du modèle de déformation

MQRE2003--- CONTROL POINT SELECTION FOR MAPPING ----------

RUN IDENTIFICATION ==> SPOT POINT SET NAME ==> CMSS

PTS	REFERENCE LINE	REFERENCE PIXEL	REGISTER LINE	REGISTER PIXEL	XRES	YRES	RMS	FLAG
1	40.00	369.00	548.62	378.60	2.03	-1.21	2.36	F
2	510.00	91.00	613.87	333.43	0.21	0.69	0.72	F
3	416.00	227.00	602.29	353.58	0.	0.	0.	N
4	777.00	267.00	641.94	368.74	-0.01	0.10	0.10	F
5	795.00	295.00	642.00	374.42	0.36	-1.42	1.46	F
6	886.00	125.00	658.64	344.46	-0.28	0.41	0.49	F
7	925.00	375.00	656.98	390.91	0.58	-0.52	0.78	T
8	795.00	104.00	648.42	339.17	-0.48	0.81	0.94	F
9	120.00	195.00	562.62	345.75	-0.62	0.77	0.99	F
10	597.00	148.00	625.29	348.38	0.	0.	0.	N

ENTER = CALCULATE COEFFICIENTS FLAG: F: FIT
T: TEST
N: DO NOTHING

Figure 27. Exemple de valeurs de XRES, YRES, et RMS

1. SAISIE DES PARAMETRES NECESSAIRES AU CALCUL DU MODELE DE DEFORMATION (menu MQRE2000, MQRE2001 et MQRE2002)

2. LECTURE DU FICHIER DE POINTS DE CONTROLE

3. CHOIX DES POINTS DE CONTROLE INTERVENANT DANS L'ESTIMATION DE LA DEFORMATION (menu MQRE2003)

4. ALGORITHME DES MOINDRES CARRES
- Calcul du polynôme approximant la déformation horizontale
- Calcul du polynôme approximant la déformation verticale
- Elimination de certains points et ré-itération du calcul jusqu'à ce que les résidus soient corrects
- Sauvegarde des coefficients des modèles de déformation (menu MQRE2004)

Figure 28. Algorithme correspondant à l'estimation du modèle de déformation

```
FORTIN  83053164437

                                                HCMMREC          Q#TABL
                                          POLYNOMIAL MODEL
        HORIZONTAL MODEL COEFFICIENTS
  ORDRE:        3
        Y  Y  Y  Y  N  N  N  N  N
        Y  Y  Y  N  N  N  N  N  N
        Y  Y  N  N  N  N  N  N  N
        Y  N  N  N  N  N  N  N  N
        N  N  N  N  N  N  N  N  N
        N  N  N  N  N  N  N  N  N
        N  N  N  N  N  N  N  N  N
        N  N  N  N  N  N  N  N  N
        N  N  N  N  N  N  N  N  N
 5.489586432805299E+02
-8.277841176571023E-01
-8.968885200486281E-05
 7.570144365645812E-09
 1.545542309023727E+00
 2.103168400346153E-03
 7.278739576444444E-08
-2.798387790903700E-03
-1.150950270050310E-06
 1.403937761224392E-06
        VERTICAL MODEL COEFFICIENTS
  ORDRE:        3
        Y  Y  Y  Y  N  N  N  N  N
        Y  Y  Y  N  N  N  N  N  N
        Y  Y  N  N  N  N  N  N  N
        Y  N  N  N  N  N  N  N  N
        N  N  N  N  N  N  N  N  N
        N  N  N  N  N  N  N  N  N
        N  N  N  N  N  N  N  N  N
        N  N  N  N  N  N  N  N  N
        N  N  N  N  N  N  N  N  N
-1.072622050546779E+03
 2.864517980623893E-01
 7.270155762735883E-04
 9.517095788541508E-08
 5.294834426716039E+00
-1.572384080486759E-03
-9.693026486315966E-07
-5.066594978184159E-03
 1.478672472848385E-06
 1.528104757467942E-06
```

Figure 29. Exemple de fichier de modèle de déformation

c. Module d'identification globale et ré-échantillonnage [41], [46]

Comme nous l'avons vu précédemment cette étape constitue la dernière phase de notre algorithme avant la phase finale de test. Les entrées de ce module sont le fichier de modélisation et l'image d'entrée; les sorties sont un fichier de grille de déformation éventuellement et l'image de sortie. (figure 30)

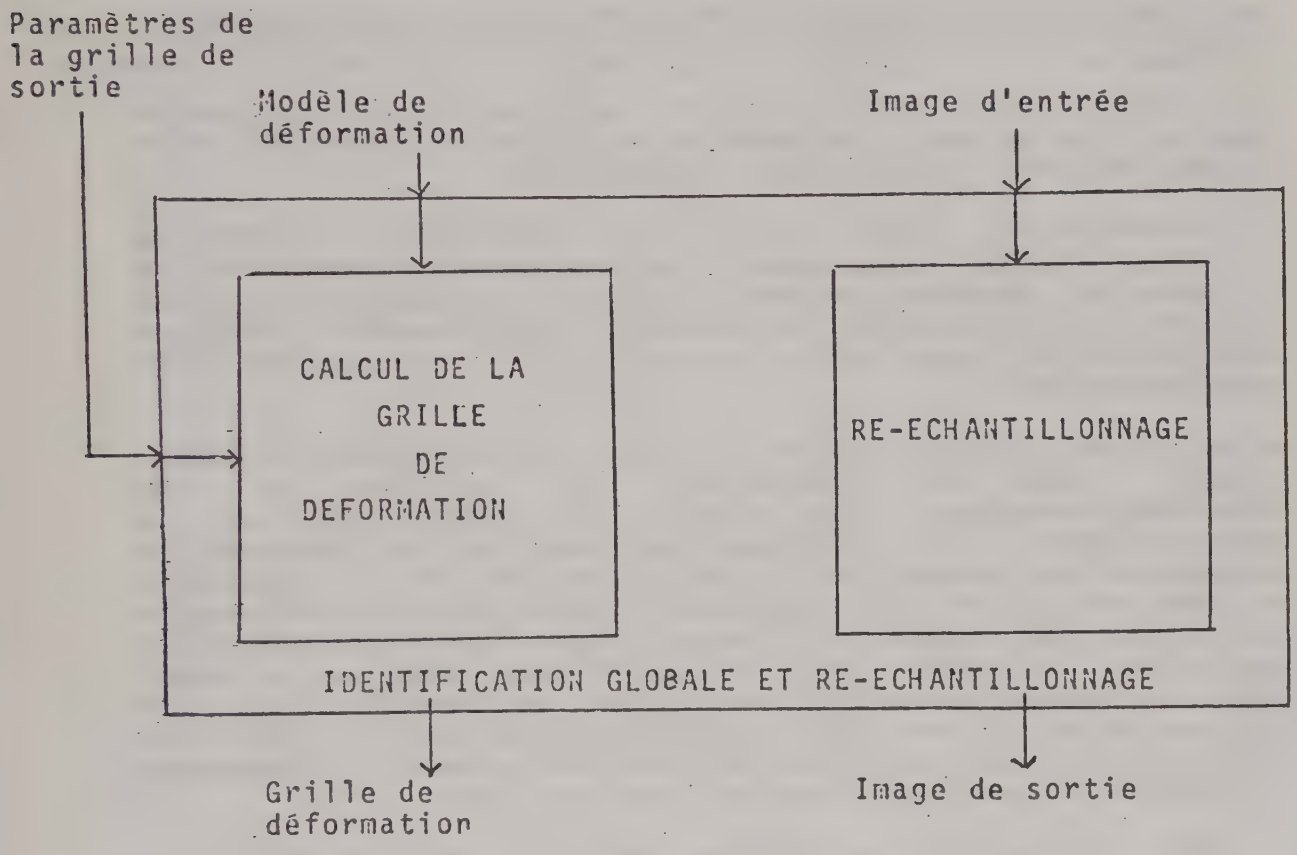


Figure 30. Module d'identification globale

Ce module procède en deux temps:

1) le choix d'une grille de sortie et le calcul de la grille d'entrée correspondante.

2) le ré-échantillonnage proprement dit. (figure 31 de la page 124)

Cette méthode est couramment employée; elle a plusieurs avantages:

- le modèle de déformation n est appliqué que sur un nombre restreint de points : les noeuds de la grille, ce qui assure un gain de temps d'execution considérable.

- L'élaboration d'une grille de déformation permet de ré-échantillonner toute image d'entrée ayant la même fonction de transfert géométrique avec l'image de référence sans faire intervenir le modèle de déformation. (par exemple: recalage de différentes bandes multispectrales); d'où un gain de temps supplémentaire.

- Le pas de la grille constitue un paramètre important intervenant dans la précision du recalage et du ré-échantillonnage. En effet, la méthode revient à échantillonner les fonctions polynomiales de déformation uniquement aux noeuds de la grille au lieu de la considérer en tous ses points. Une interpolation bilinéaire est ensuite faite pour les points de l'image situés à l'intérieur d'une maille de la grille. Tout se passe donc comme si on avait fait une approximation bilineaire par morceaux des fonctions polynomiales. Il est clair que le pas de la grille est très lié à l'ordre des fonctions polynomiales puisqu'il représente la période d'échantillonnage de ces fonctions.

- Soit on choisit la grille de façon équi-répartie sur l'image de sortie: le pas de cette grille sera alors d'autant plus petit que l'ordre des polynômes choisis est élevé.

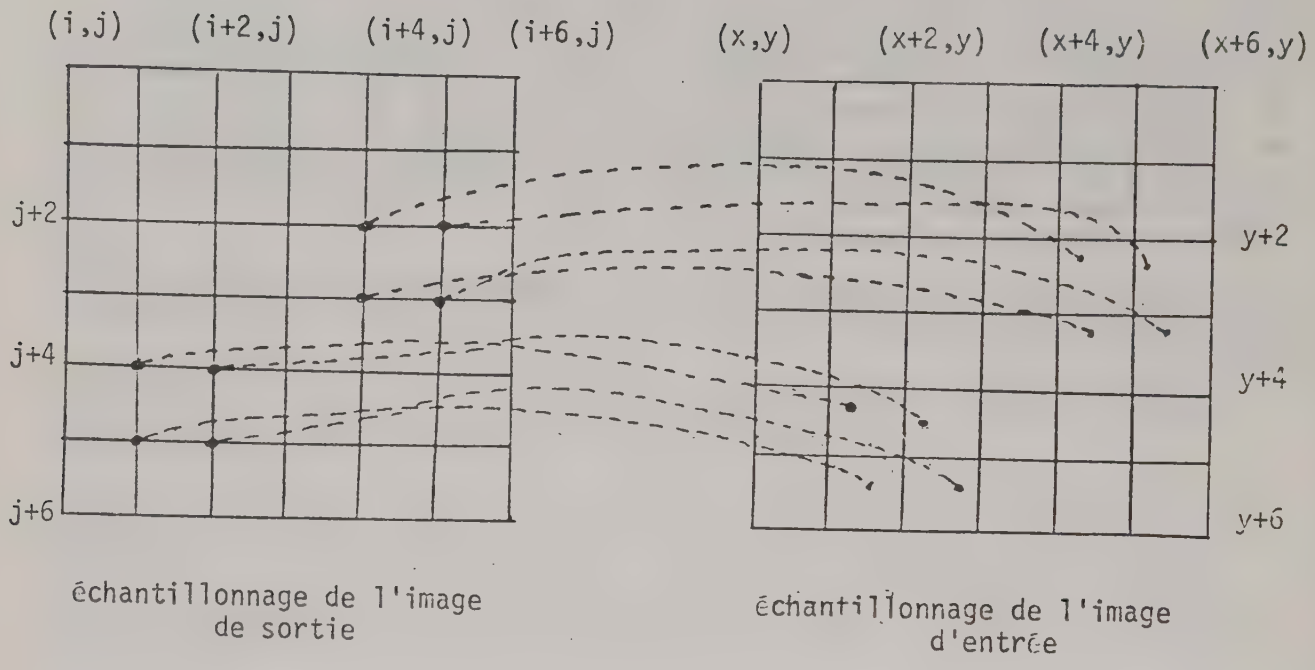
- Soit on comprime la grille dans les régions perturbées (par exemple aux bords des images)

Grille d'entrée et de sortie

Cette opération consiste comme nous l'avons vu précédemment à poser une grille sur l'image de sortie et à calculer à l'aide du modèle de déformation choisi une grille sur l'image d'entrée. Dans l'algorithme développé, la grille

de sortie est équi-répartie sur toute l'image. L'utilisateur doit choisir le pas de cette grille, les coordonnées du premier point de l'image de sortie par rapport au système de coordonnées de l'image de référence, et la taille de l'image de sortie (l'utilisateur peut choisir de ne ré-échantillonner qu'une fenêtre correspondant à une région de l'image d'entrée). Un pas de grille entre 20 et 30 est correct pour des images-satellites de 1024x1024 points. Il est sûr que cette grille serait trop grossière pour des images provenant de scanners aéroportés.

Tous ces paramètres sont saisis par l'intermédiaire des menus présentés figure 32 de la page 125 et figure 33 de la page 126



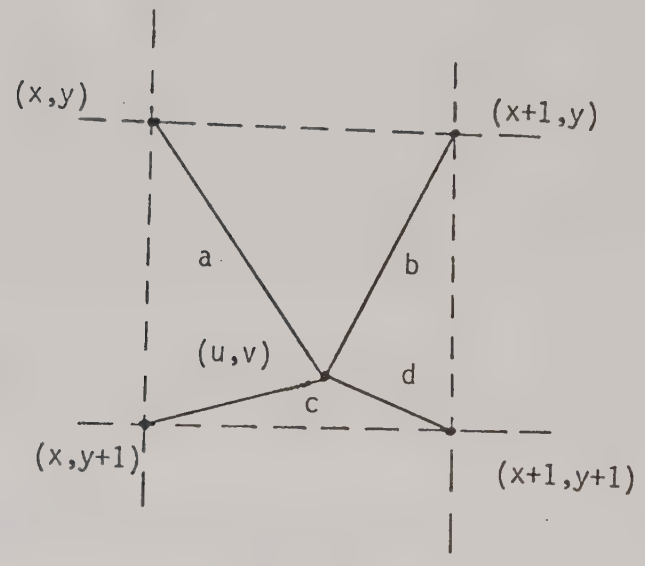


Figure 31. Principe de ré-échantillonnage

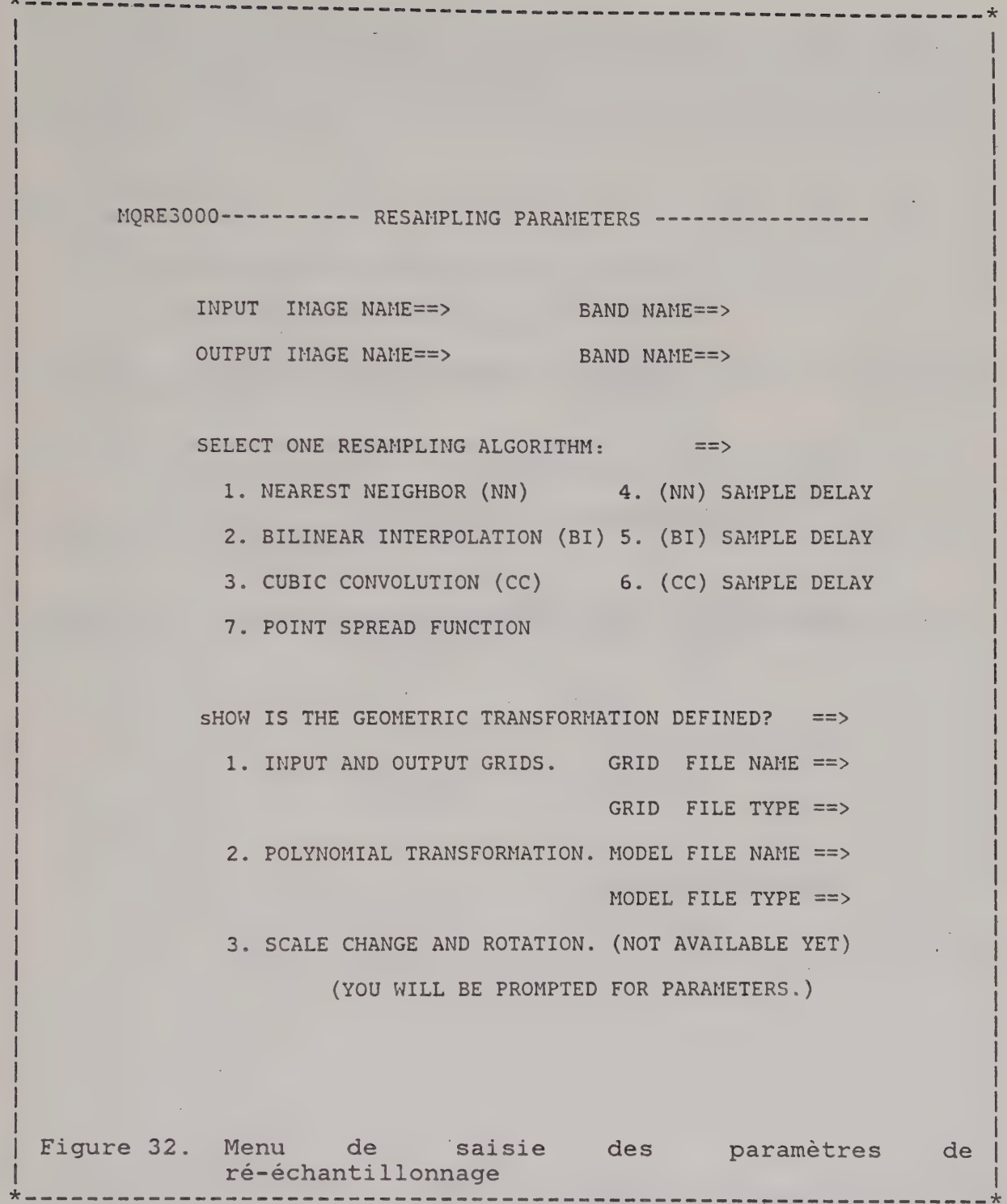


Figure 32. Menu de saisie des paramètres de ré-échantillonnage

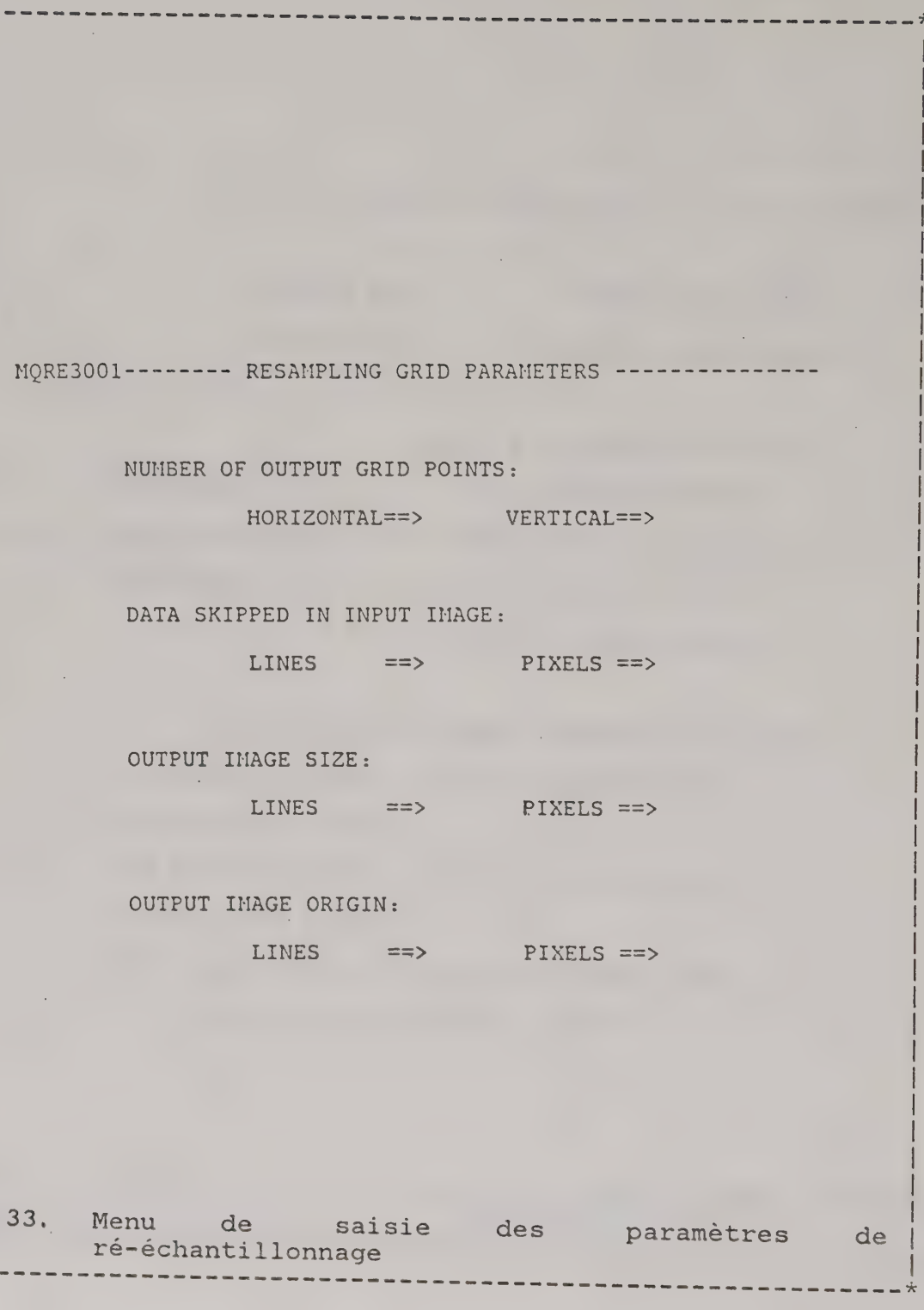


Figure 33. Menu de saisie des paramètres de ré-échantillonnage

La grille d'entrée est alors calculée en appliquant en chacun des noeuds de la grille de sortie le modèle de déformation permettant le transfert géométrique de l'image de référence à l'image d'entrée. (modèle inverse). Les grilles d'entrée et de sortie peuvent être sauvegardées dans un fichier contenant:

1) L'identification de l'utilisateur et la date de création du fichier

2) Un enregistrement comprenant un commentaire éventuel.

3) Le nom du modèle de déformation utilisé

4) Les coordonnées horizontales (point) de la grille de sortie: grille horizontale

5) Les coordonnées verticales (ligne) de la grille de sortie: grille verticale

6) les coordonnées horizontales et verticales de la grille d'entrée correspondante.

Un exemple d'un tel fichier est présenté figure 34 de la page 128

```
FORTIN  83243170518

   MODEL FILE:     PARIS        SPOLA
       NBR OF PTS          3           3
   HORIZONTAL OUTPUT GRID
1.000000E+00
3.100000E+01
6.100000E+01
   VERTICAL OUTPUT GRID
1.000000E+00
3.100000E+01
6.100000E+01
   HORIZONTAL INPUT GRID
3.097141E+02
3.151184E+02
3.205227E+02
3.101440E+02
3.155483E+02
3.209526E+02
3.105740E+02
3.159783E+02
3.213826E+02
   VERTICAL INPUT GRID
5.531479E+02
5.524897E+02
5.518315E+02
5.568025E+02
5.561443E+02
5.554861E+02
5.604570E+02
5.597988E+02
5.591406E+02
```

Figure 34. exemple de fichier de grille

Ré-échantillonnage

Un fois déterminée la position géométrique dans l'image d'entrée d'un point (i,j) de l'image de sortie (soit par l'application du modèle de déformation s'il s'agit d'un noeud de la grille soit par interpolation bilinéaire s'il s'agit d'un point intérieur à une maille de la grille), il reste à associer à ce point la radiométrie correspondante. Il est sûr que les coordonnées du point dans l'image d'entrée, obtenues par notre fonction de transfert géométrique, ne sont pas entières, il est donc nécessaire de ré-échantillonner l'image d'entrée de manière à déterminer la radiométrie la plus exacte possible du point ainsi determiné.

Trois méthodes de ré-échantillonnage sont généralement employées:

- Le plus proche voisin

- L'interpolation bilinéaire

- La convolution cubique

1) Le plus proche voisin

Cette méthode consiste à choisir pour radiométrie, celle du point le plus proche.

$$I(x,y)=I(i,j)$$

Cette méthode donne un effet de petits carrés sur l'image de sortie.

2) Interpolation bilinéaire

Il s'agit d'une interpolation en deux dimensions à partir des quatre plus proches voisins du point (x,y).

$$I(x,y)=\left(a\,I(i,j)+b\,I(i+1,j)+c\,I(i,j+1)+d\,I(i+1,j+1)\right)/(a+b+c+d)$$

Cette fois, l'image est beaucoup plus lissée que la première.

3) Convolution cubique

Cette méthode consiste à simuler un ré-échantillonnage parfait en convoluant la fonction intensité par la fonction SINX/X. En effet ceci revient à multiplier par la fonction créneaux dans le domaine fréquentiel; On reconstruit ainsi le

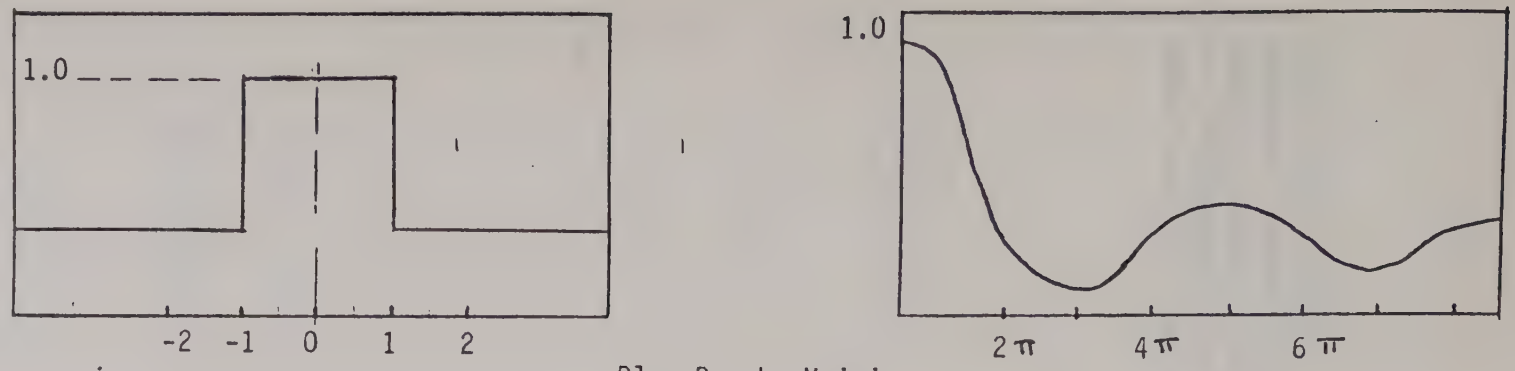
signal intensité sans aucune perte d'information, il reste ensuite à échantillonner ce signal de manière à obtenir l'intensité du point recherché. (voir la comparaison des spectres de Fourier des fonctions de convolution pour les trois méthodes de ré-échantillonnage figure 35 de la page 131)

La fonction SINX/X est approximée par une fonction spline cubique en utilisant 4 points de l'image [12]

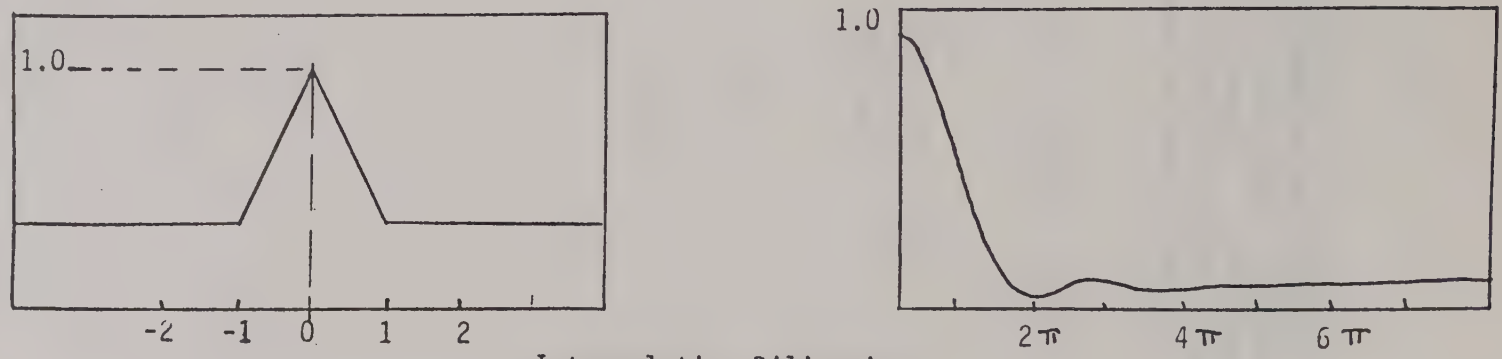
L'algorithme consiste à faire cette convolution deux fois (horizontalement et verticalement) de manière à obtenir la radiométrie réelle du point (x,y).

Domaine Spatial

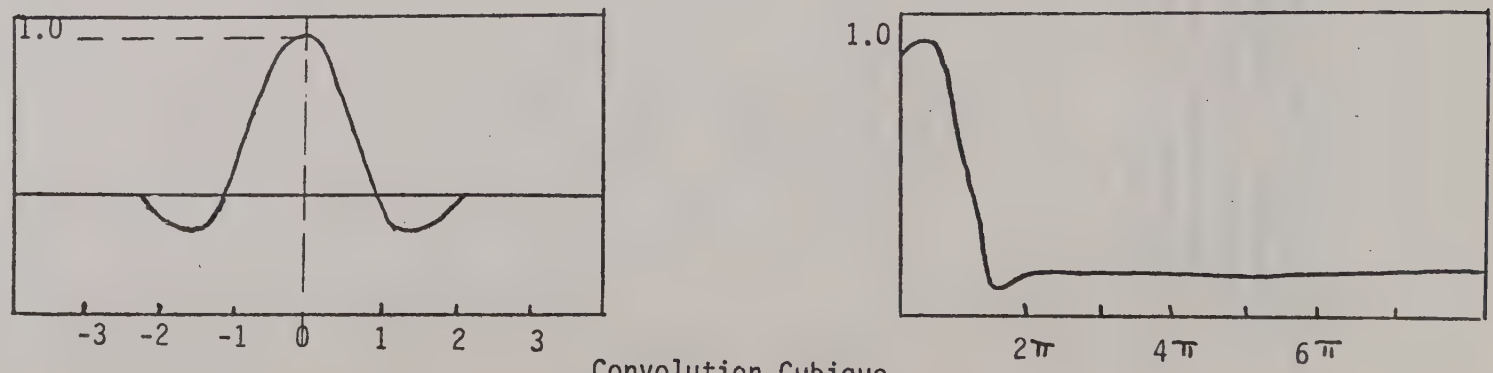
Domaine Spectral



Plus Proche Voisin



Interpolation Bilineaire



Convolution Cubique

Figure 35. Spectre de Fourier des fonctions de convolution pour les trois méthodes de ré-échantillonnage.

Ce programme est effectué en assembleur. Il est donc très rapide: quelques temps d'execution sont reportés tableau figure 36 de la page 133. Il est à noter que ces temps représentent les temps d'execution et non les temps CPU, et que nous utilisons pour ce faire un système IBM 3031 en temps partagé.

TEMPS DE RE-ECHANTILLONNAGE

TAILLE IMAGE	NOMBRE DE POINTS DE GRILLE	TEMPS EN MIN ET SEC
512 x 512	2 x 2	1'46"
512 x 512	20 x 20	1'50"
512 x 1024	2 x 2	4'16"
512 x 1024	20 x 20	5'18"
1024 x 1024	2 x 2	6'13"
1024 x 1024	20 x 20	9'29"

Figure 36. Exemple de temps d'execution du programme de ré-échantillonnage(Le système IBM 3031 étant utilisé en temps partagé)

Le synoptique général de ce module est donné figure 37 de la page 135.

1. SAISIE DES PARAMETRES NECESSAIRES A LA RECTIFICATION ET AU RE-ECHANTILLONNAGE
(menu MQRE3000 et MQRE3001)

2. SI LA TRANSFORMATION EST DEFINIE PAR LE FICHIER DE MODELE
- Lecture du fichier de modèle
- Calcul de la grille de sortie
- Evaluation de la grille d'entrée à l'aide du modèle
- Sauvegarde des deux grilles (choix de l'utilisateur: menu MQRE3002)
- Ré-échantillonnage

3. SI LA TRANSFORMATION EST DEFINIE PAR LE FICHIER DE GRILLES
- Ré-échantillonnage

4. SI LA TRANSFORMATION EST DEFINIE PAR LA DONNEE DE COEFFICIENTS D'ECHELLE ET DE ROTATION
- Lecture des coefficients
- Calcul de la grille de sortie
- Evaluation de la grille d'entrée à l'aide du modèle
- Sauvegarde des deux grilles (choix de l'utilisateur: menu MQRE3002)
- Ré-échantillonnage

5. VERIFICATION DES GRILLES D'ENTREE ET DE SORTIE (menu MQRE3003)

Figure 37. Algorithme du module d'identification globale et de ré-échantillonnage.

CINQUIEME CHAPITRE

APPLICATIONS

L'algorithme de recalage que nous avons développé a été employé dans plusieurs projets au sein du centre et dans d'autres centres scientifiques IBM ; Nous présentons ici diverses applications de recalage multitemporel et multi-source. Mais dans un premier temps nous allons discuter des méthodes d'évaluation de la qualité de la correction éffectuée sur une image [71] , [70].

Elle peut être mesurée à plusieurs étapes:

On procède d'abord à l'évaluation du modèle, elle se fait en mesurant les résidus entre les coordonnées réelles des points de contrôle et des points tests sur l'image à recaler et leurs coordonnées estimées par le modèle de déformation.

On peut alors calculer l'erreur quadratique moyenne de recalage sur toute l'image par l'expression suivante:

$$RMS = \frac{1}{m}\sqrt{\sum_{i=1}^{m} [Res(i)]^2}$$

où M est la somme des points de contrôle et des points tests.

Cette quantité donne une borne inférieure de la précision du recalage. En effet:

le modèle de déformation n'étant appliqué que sur les noeuds d'une grille, l'erreur de recalage commise sur ces noeuds peut être supérieure à celle commise sur les points de contrôle et sur les points test si ceux-ci ne sont pas bien répartis sur toute l'image.

D'autre part, les points intérieurs à chaque maille étant calculés par interpolation bilinéaire, l'erreur commise sur ces points est supérieure à celle commise sur les noeuds et elle est d'autant plus importante que le degré du modèle est élevé ou que le pas de la grille est grand.
Plus le degré des polynômes de déformation est élevé plus le pas de la grille de sortie doit être petit de manière à ce que l'approximation linéaire par morceaux des polynômes de déformation soit justifiée.

L'erreur quadratique moyenne ne donne une idée précise de l'erreur moyenne réelle de la correction que si les points de contrôle et les points tests sont bien répartis sur l'image de manière à ce que le modèle soit "accroché" sur toute l'image.

Une fois l'image de sortie ré-échantillonnée, la première approche d'évaluation des erreurs de la rectification est qualitative, elle consiste en la visualisation simultanée ou en la superposition des images de référence et de sortie. L'écran image 7350 étant de haute définition, cette première évaluation peut être très précise.

Une évaluation quantitative des erreurs de recalage consiste à reprendre des points test sur l'image de référence et sur l'image de sortie du processus de recalage et à faire une évaluation statistique de l'erreur globale de recalage en prenant plusieurs ensembles de points test dans différentes régions de l'image, en évaluant d'abord une erreur quadratique moyenne sur chaque région puis l'erreur quadratique globale.

Cette technique donne une idée très précise de la qualité du recalage mais elle a l'inconvénient d'être lourde puisqu'il faut reprendre un ensemble de points test sur les images.

Dans le cas d'images corrélables (correspondant à un signal de même nature ou binarisé) il est possible de poser une même grille de points test sur l'image de référence et sur l'image de sortie, une recherche du maximum de corrélation autour de chaque noeud de la grille permet alors de calculer les erreurs de la correction en ces points et d'évaluer l'erreur quadratique moyenne sur l'image globale.

Nous présentons dans ce qui suit 4 exemples de recalage sur différents types d'images:

	REFERENCE	ENTREE
Paris	Spot simulation	LANDSAT MSS
Toulon	CARTE GEOLOGIQUE	LANDSAT MSS
Toulon	LANDSAT MSS	HCMM
Ventou	LANDSAT MSS	SEASAT

Les photographies correspondant aux scènes étudiées, sont données dans l'ordre suivant:

1) l'image de référence

2) l'image d'entrée

3) l'image de sortie ré-échantillonnée

4) la superposition de l'image de référence et de l'image de sortie

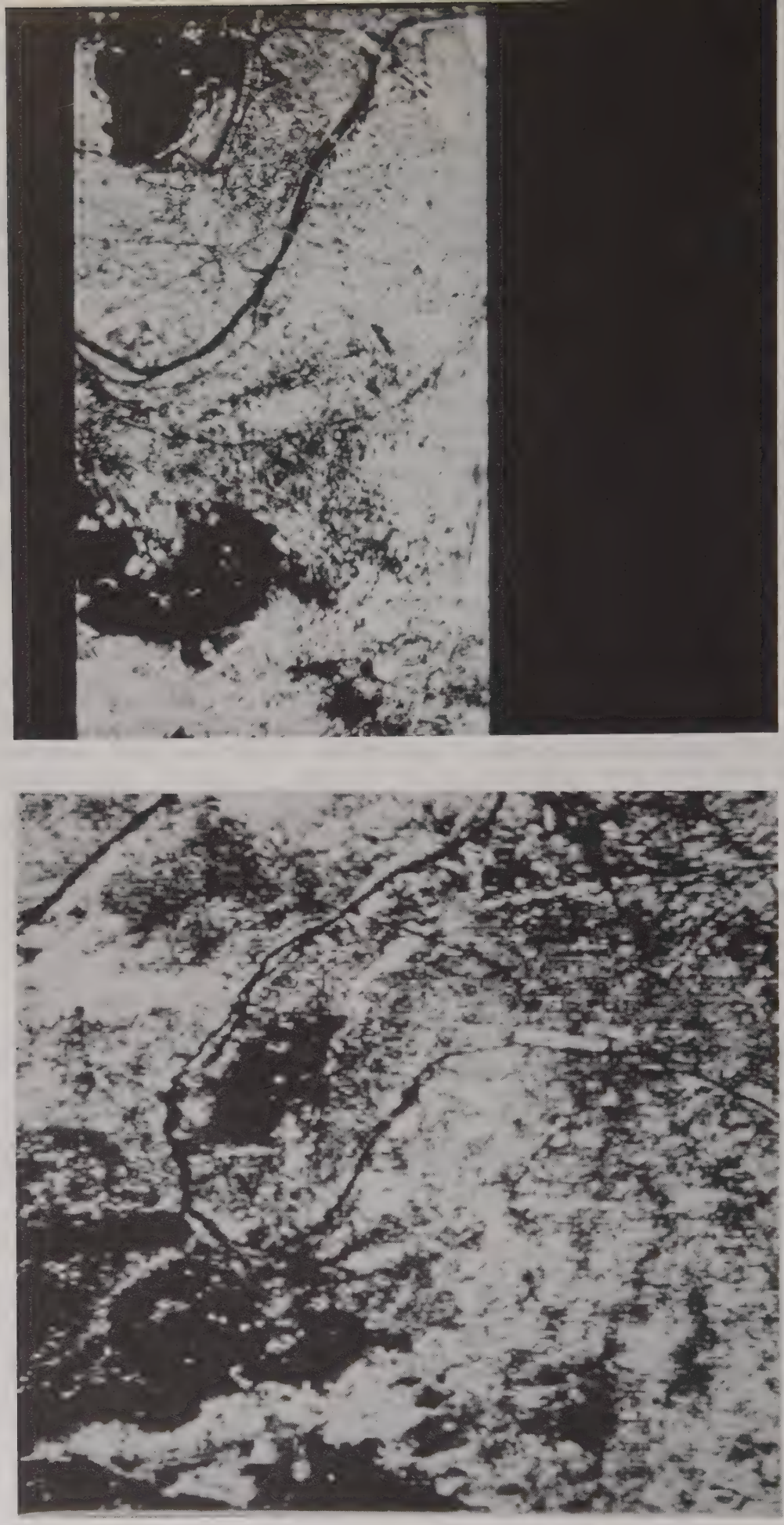


Figure 38. Paris: en haut Simualtion Spot (référence) en bas Landsat MSS (entrée)

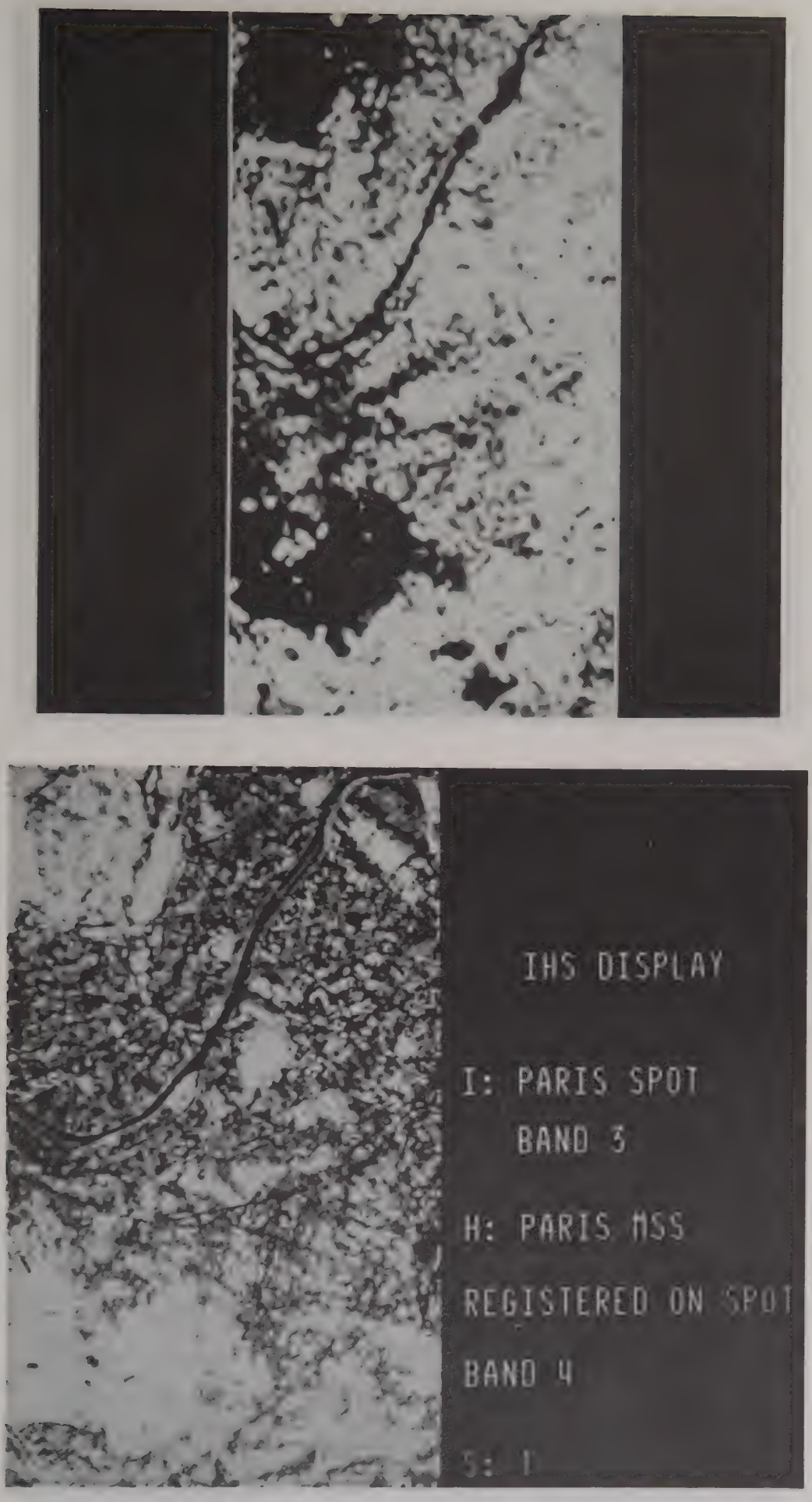


Figure 39. Paris: en haut Landsat MSS ré-échantillonnée en bas Superposition de Landsat MSS ré-échantillonnée sur Spot

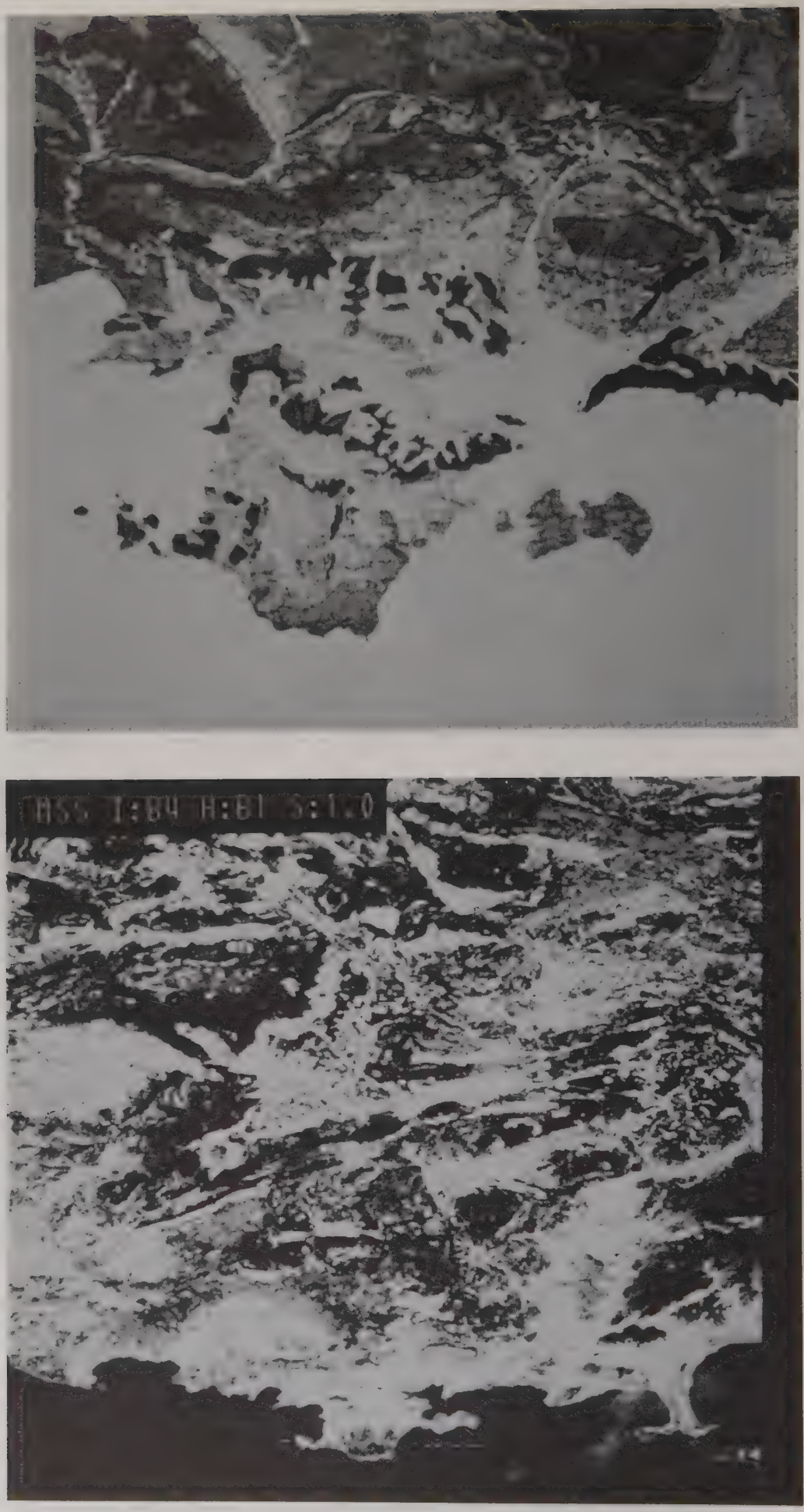


Figure 40. Toulon: en haut Carte géologique (référence) en bas Landsat MSS (entrée)

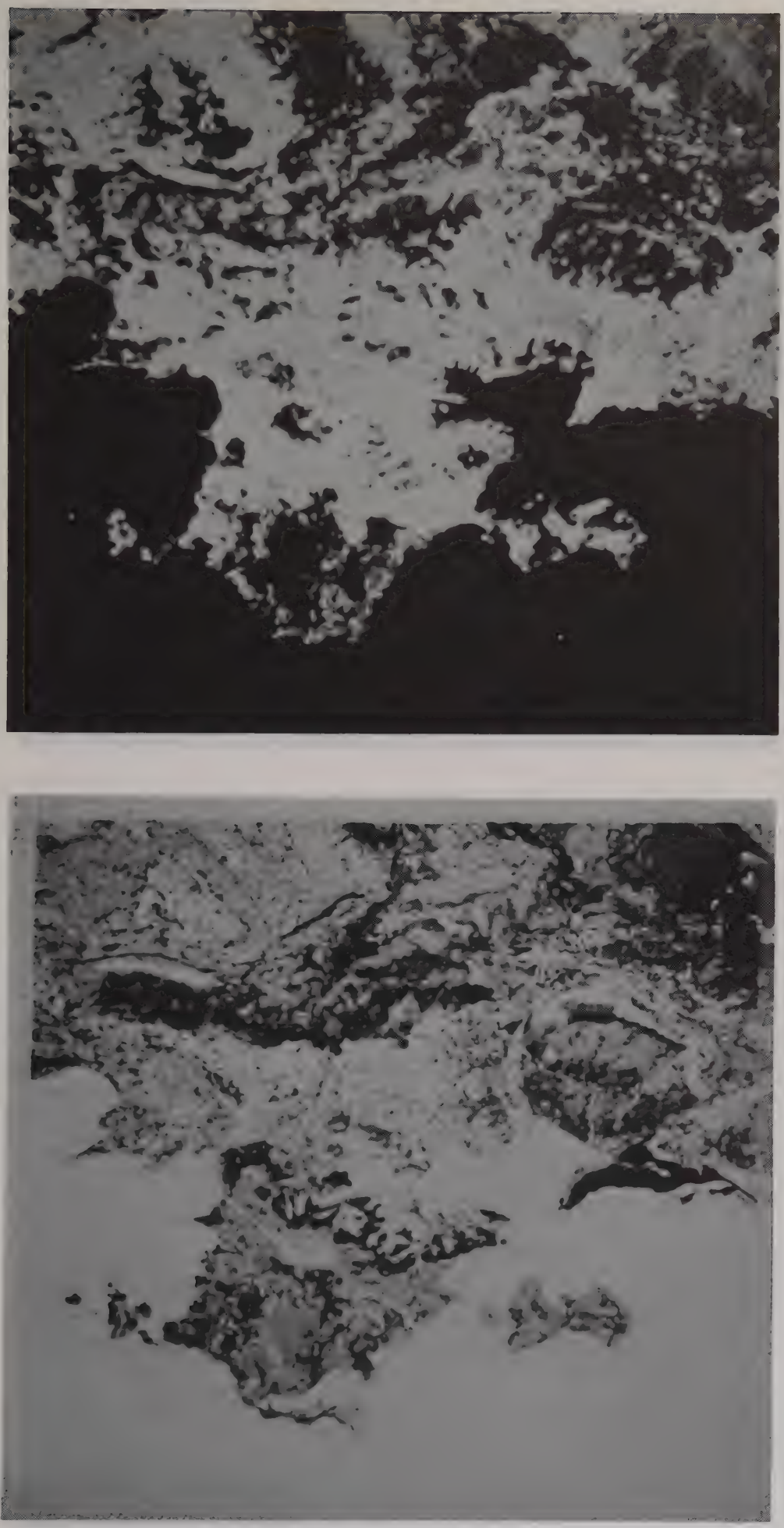


Figure 41. Toulon: en haut Landsat MSS ré-échantillonnée en bas Superposition de Landsat MSS ré-échantillonnée sur la carte

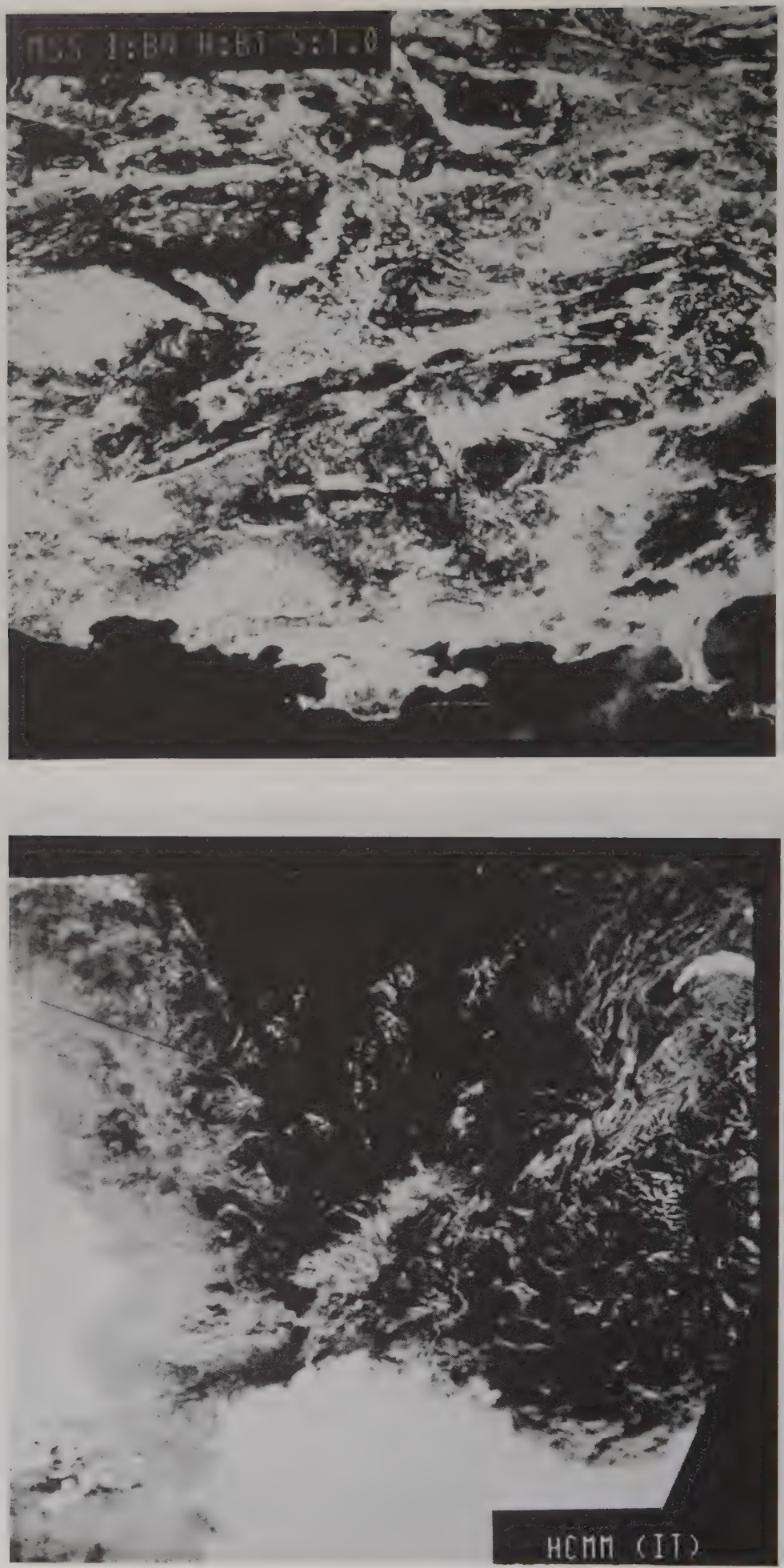


Figure 42. Toulon: en haut Landsat MSS (référence) en bas HCMM (entrée)

Figure 43. Toulon: en haut HCMM ré-échantillonnée en bas Superposition de HCMM ré-échantillonnée sur Landsat MSS

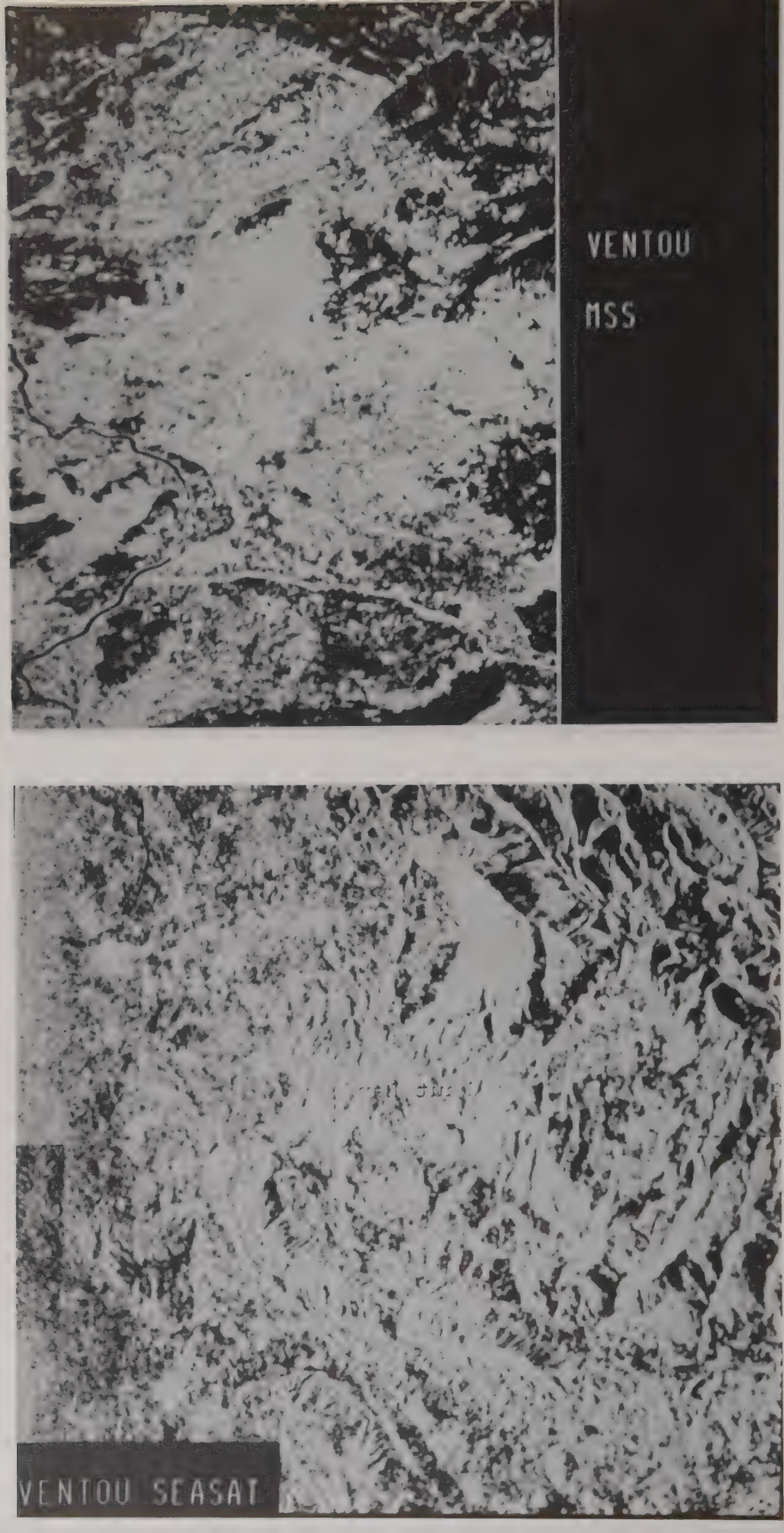
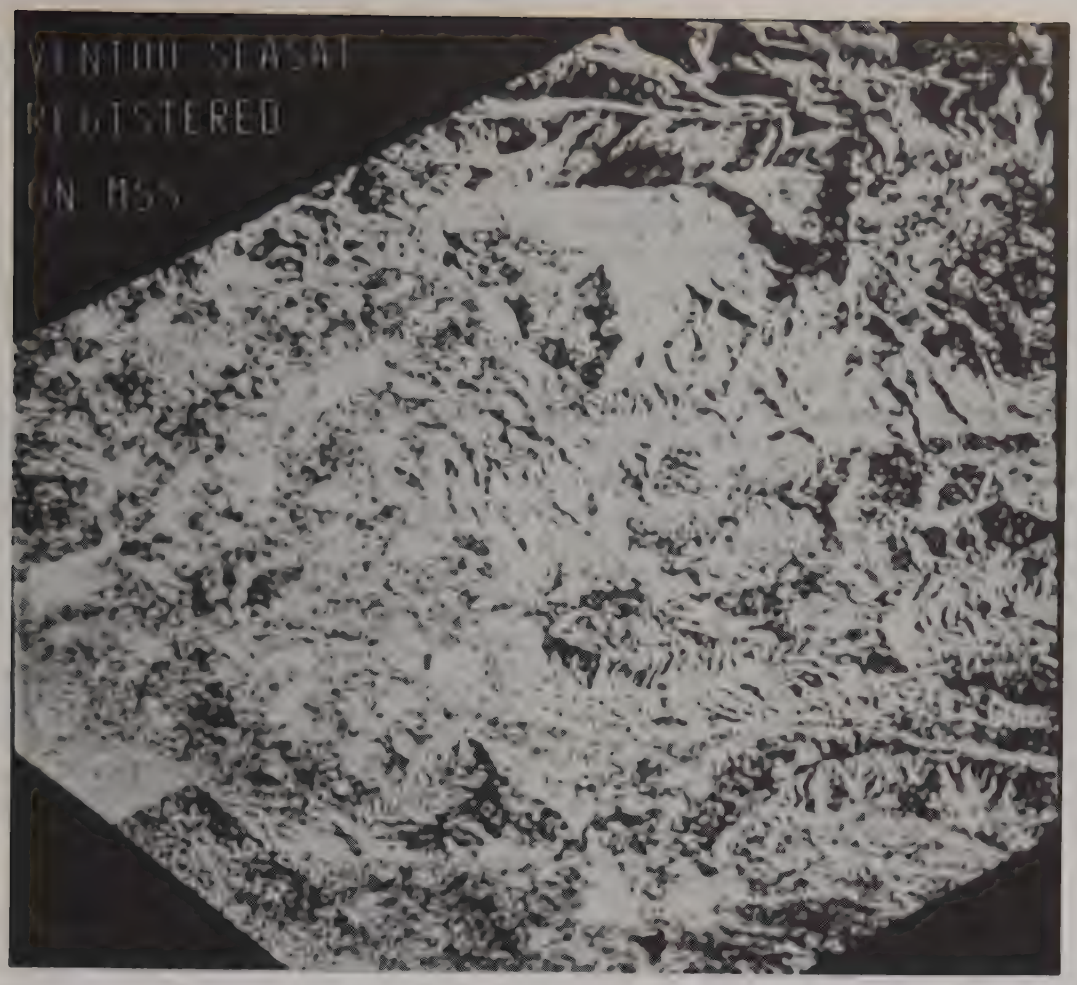


Figure 44. Ventou: en haut Landsat MSS (référence) en bas Seasat (entrée)



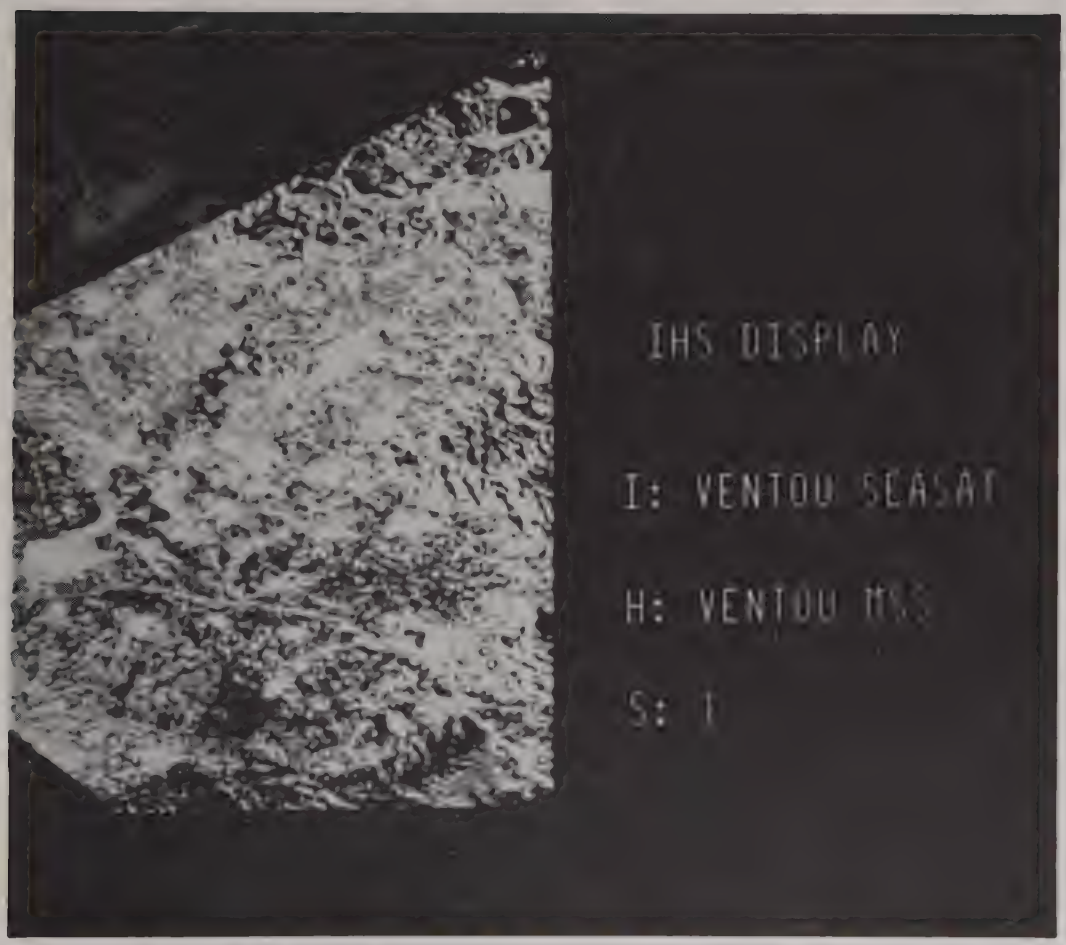


Figure 45. **Ventou:** en haut Seasat ré-échantillonnée en bas Superposition de Seasat ré-échantillonnée sur Landsat MSS

D'autre part des recalages multitemporels d'images Landsat MSS ont permis de constituer une mosaïque d'images sur la région des Cévennes pour étudier des structures de failles s'étendant sur plusieurs images.

Dans certaines applications, il est inutile de ré-échantillonner l'image entièrement; Seuls certains paramètres doivent être extraits de l'image: Prenons le cas des problèmes de classification: le problème est d'extraire les statistiques des champs d'entrainement pour classifier l'image d'entrée. Ces champs d'entrainement peuvent être plus faciles à repérer sur une autre image; nous prenons alors cette image, comme image de référence, calculons un modèle de déformation entre l'image précédente et l'image à classifier, il est alors possible de transférer à l'aide de ce modèle, les champs d'entrainement pris sur l'image de référence sur l'image à classifier. La classification de cette image devient alors possible bien que cette image n'ait pas été recalée et que les champs d'entrainement aient été repérés sur une autre image. L'avantage de cette méthode est d'éviter la création d'une image qui prend un grand espace disque et n'apporte pas d'information supplémentaire dans ce cas.

Cette méthode a été utilisée pour classifier l'image SEASAT de la région du Ventou à partir de champs d'entrainement repérés sur une image Landsat MSS de la même région, et pour classifier une image NOAA à partir de champs d'entrainement repérés en coordonnées géographiques sur une carte. Il est à noter pour ce dernier exemple qu' il a été possible d'effectuer un recalage extrêmement précis (sous-pel) de l'image NOAA sur un système de coordonnées géographiques grâce à un fichier de points de contrôle fourni avec l'image, donnant pour les noeuds d'une grille uniformément répartie sur l'image les coordonnées géographiques exactes (longitude et latitude).

CONCLUSION

Le recalage d'images est une opération de toute importance en télédétection dans toutes les applications multiconceptuelles qu'il s'agisse de suivi multi-temporel ou d'analyse multispectrale. Cette opération est d'autant plus délicate que les caractéristiques des capteurs sont de plus en plus riches: résolution, angle de prise de vue, longueur d'onde et bande passante, caractère actif ou passif pour l'imagerie radar, et que dans la mesure du possible, on ne souhaite pas utiliser de modèles numériques de terrain qui ne sont pas partout disponibles.

Cette thèse a comporté deux étapes: la première a consisté en l'élaboration d'un algorithme de recalage "aveugle par rapport aux données", c'est à dire ne dépendant à aucun moment de la nature des données qui lui seraient présentées, s'insérant dans un système de traitement d'images de télédétection. Cet algorithme a été testé sur bon nombre de données différentes dans divers Centres Scientifiques IBM, nous présentons dans cette thèse des résultats concernant les images provenant des satellites HCMM, Landsat MSS, Seasat et des images de simulation de Spot (fournies à l'IAURIF par le GDTA) .

Cet algorithme s'avère insuffisant pour le recalage d'images provenant de scanners aéroportés (les essais de recalage d'une simulation de Spot sur la région parisienne de 1983 sur celle de 1981 ont échoué) il en est de même pour les images radar provenant de Seasat ou de Sir A pour lesquelles les déformations contiennent des composantes de fréquences spatiales plus élevées et sont beaucoup moins cohérentes suivant les différentes régions de l'image.

C'est pourquoi la seconde étape de la thèse (chapitre 3) a consisté en l'étude de différentes approches d'un modèle de déformation régional sur l'image et non plus global.

Ce modèle devant être également "aveugle par rapport aux données" et ne devant pas créer de discontinuités sur l'image résultante, la solution retenue a été une modélisation élastique de la déformation.

Il serait interessant pour la suite de ce travail d'appliquer cette méthode à des images provenant de différents capteurs et de comparer la précision des résultats obtenus avec celle des résultats obtenus dans le cas d'une modélisation globale. D'autre part, il semble interessant d'étudier de façon quantitative la valeur de la constante d'élasticité "mu" intervenant dans le modèle élastique en fonction des différentes paires d'images à recaler.

L'opération de recalage n'intervient pas qu'en télédétection , il est également indispensable en traitement d'images médicales

lorsqu'il s'agit de suivre un phénomène sur une séquence d'images (exemple: cardiologie). Les déformations sont alors très locales sur l'image puisqu'elles affectent différemment les organes et le milieu environnant. Le problème est d'autant plus accru que la précision du recalage demandée est très élevée (inférieure au dixième de pel) de manière à ne faire apparaitre aucun artéfacte lors de combinaisons de ces différentes images; de plus les méthodes employées doivent être très automatisées et relativement rapides de manière à être bénéfiques au diagnostique médical (cf Etude en cours à la Compagnie Générale de Radiologie). Ici encore l'application d'un modèle de déformation localisé de type élastique apporterait une grande amélioration aux résultats obtenus.

ANNEXE

Algorithme des moindres carrés

La méthode employée pour calculer les coefficients des polynômes de déformation horizontale et verticale est une méthode des moindres carrés par coallescence.

Les polynômes en question étant de degré entre 0 et 8, il y aura au maximum 45 coefficients à estimer pour chaque polynôme. Ce qui implique un système d'équations très important à résoudre. D'autre part ces équations faisant intervenir les coordonnées des points de contrôle, les nombres à manipuler ont une dynamique très importante. Il y a donc lieu d'être très prudent en ce qui concerne la précision des calculs.

méthode

Soit P et Q les deux polynomes à estimer:

$U=P(x,y)$

$V=Q(x,y)$

(U,V) étant les coordonnées d'un point de l'image d'entrée.

(x,y) étant les coordonnées d'un point de l'image de référence.

L'algorithme sera repris deux fois, une fois pour le polynôme horizontal et une seconde fois pour le polynôme vertical.

soit $P(x,y) = \sum_{i=0}^{m-1} a_i m_i(x,y)$

où a(i) est le coefficient du monôme m(i)(x,y), ième monôme du polynôme P.
Si n est l'ordre du polynôme: $m = (n+1)*(n+2)/2$

Ces monômes peuvent être différents en fonction du type de polynôme choisi.

Dans le cas de polynômes simples: $m_i(x,y) = x^p y^k$ avec $0 \leq p+k \leq n$

Pour chacun des points de contrôle, on a

$$u_h = \sum_{i=0}^{m-1} a_i m_i(x_h, y_h)$$

Soit pour l'ensemble des points de contrôle:

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_h \\ \vdots \\ u_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_0(x_h, y_h) & m_1(x_h, y_h) \cdots & m_{m-1}(x_h, y_h) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ \vdots \\ a_{m-1} \end{pmatrix}$$

soit U = M*A

avec U de dimension (p,1)

M " (p,m)

A " (m,1)

p varie dans notre algorithme entre 4 et 200 et m entre 3 et 45.

Reprenons l'équation matricielle U = M*A

Première opération: $M^T * U = M^T * M * A$

Soit B= $M^T * M$ avec B de dimension (m,m)

Cette étape permet d'obtenir B qui est une matrice définie positive symétrique et non singulière dans tous les cas sauf de rares exceptions où on emploie alors des techniques de pseudo-inverse (Pratt)

on obtient donc: $M^T * U = B * A \Rightarrow A = B^{-1} * M^T * U$

A condition d'inverser B, on obtient directement l'ensemble des coefficients recherchés.

Cette méthode est directement employée dans certains algorithmes de recalage. Cependant l'inversion de la matrice B pose quelques problèmes numériques:

En effet, prenons le cas extrême où le polynôme choisi est simple et de degré 8; choisissons un point de contrôle de coordonnées (1000,1000) sur l'image de référence. Le dernier monôme du polynôme est alors de l'ordre de (1000)**8

Le terme B(45,45) est donc de l'ordre de 10**48, le terme B(1,1) étant égal à 45 car

La matrice à inverser est de dimension (45,45) et la dynamique de ses coefficients est de 10**48

Il est clair que les algorithmes d'inversion de matrice type Gauss-Jordan et même Cholesky ne sont pas assez robustes pour ce genre de problème.

En fait, il est préférable de reprendre l'équation: $M^T * U = B * A$

Nous commençons par normaliser les coefficients de B en les divisant par le pivot de B

puis nous résolvons le système d'équations ci-dessus par la méthode de Cholesky après avoir triangulariser B par la factorisation de Cholesky

Les résultats ainsi obtenus sont tout à fait satisfaisants.

BIBLIOGRAPHIE

1 AHUJA N., Dot pattern processing using Voronoi neighborhoods P.A.M.I. Vol 4 No 3 May 1982 pp: 336-343

2 ANUTA PAUL E., Spatial registration of multispectral and multitemporal digital imagery using FFT techniques IEEE (1970)

3 ARNONE R., Evaluation of CZCS and Landsat for coastal optics and water properties. Seventeenth International Symposium on remote sensing of environment. Ann Arbor May 1983 (Poster Session B)

4 ASFAR L., Recherche de contours dans une image Landsat. Congrès de reconnaissance de forme et d'intelligence artificielle AFCET Sept 1981 pp: 237-248

5 ASFAR L., A method for contour detection, segmentation and classification of a Landsat image. IGASS'81 Washington(U.S.A.) pp: 298-304 Vol 1

6 BAJCSY R.& BROIT C., Matching of deformed images IJCPR Munich 1982 pp:351-353

7 BARNEA, SILVERMAN, A class of algorithms for digital image registration IEEE Trans Comput Vol C21 pp 179-186 Feb72

8 BECKER F., HECHINGER E., RAFFY M., Comparaison between the accuracy of a new discretization method and an improved Fourier method to evaluate heat transferts between soil and atmosphere. Journal of geophysical research Vol 87 no: 09 pp: 7325-7339 August 1982

9 BECKER F., Physique fondamentale de la télédétection. Notes de cours tirées de "Principes physiques et mathématiques de la télédétection. Ecole d'été de physiques spatiales du CNES Strasbourg 18 Aout-15 Septembre 1978

10 BERNSTEIN R., Digital image processing for remote sensing IEEE press

11 BERNSTEIN R., Digital processing of earth observation imagery IBM journal August(74)

12 BERNSTEIN R., Digital image processing of earth observation sensor data IBM journal of research and dvl Vol 20 No 1 JAN76 pp: 50-57

13 BLOM R., DAILY M., Radar image processing for rock-type discrimination. JPL California IEEE Tr. on geoscience and remote sensing pp: 343-351

14 BERGER, Cours de théorie du signal et de traitement de l'information ESIEE (1979)

15 Broit C., Optimal registration of deformed images University of Pennsylvania Philadelphia

16 BURR D.J., A dynamic model for image registration . Pattern recognition and image processing Chicago 1979 pp:17-24

17 BROWN K.Q., Voronoi diagrams from convex hulls. Information processing letters Vol 9 No 5 Dec 1979 pp: 223-228

18 CARAUX D. AND AUSTIN R.W., Extension of the plume of the Rhône river in coastal waters of the gulf of Lions (Northwestern Méditerranean) monitored with Nimbus-7 coastal zone color scanner. Seventeenth International Symposium on remote sensing of environment. Ann Arbor May 1983 (Poster Session B)

19 CARLSON T.N., DODD J.K., BENJAMIN S.G., COOPER J.N., Satellite estimation of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertia. Journal of remote sensing of environment (January 1981)

20 CARROU J.C., Utilisation des informations Precilec (attitude et position avion) pour les corrections des images. Centre National d'Etudes Spatiales Toulouse

21 CHEN ZEN, Data description and geometric operations of image-based géographic information Proceedings of the workshop on Picture data description and management IEEE Computer Society August 27-28 1980

22 CHENG L.U. & HUANG T.S., Image registration by matching relational structures. IJCPR Munich 1982 pp:354-356

23 COLWELL R.N., History and future of remote sensing technology and education NASA Conference publication 2102, Corse, June 1978.

24 COUREL M.F., HABIF M., Measurement of changes in Sahelian cover using Landsat albedo images XXIV Plenary Meeting of COSPAR and the V General Assembly of Scope. Ottawa (Canada) May-June 1982.

25 CRAIG R.G., Precision in the evaluation of Landsat autocorrelation: the terrain effect 15TH Int. Symp. on Rem. Sens. of Envir. May 81 Ann Arbor, MI

26 CRIST E.P., Cultural and environment effects on crop spectral development patterns as viewed by Landsat. Seventeenth International Symposium on remote sensing of environment. Ann Arbor May 1983 (Poster Session C)

27 DAVIS W.A., KENUE S.K., Automatic selection of control points for the registration of digital images Canada University of Alberta

28 DEVIJVER P.A., MAYBANK ST., Computation of Delaunay triangulation of a convex polygon under a minimum space complexity constraint Philips Research Laboratory IEEE 1982

29 DEVIJVER P.A., DEKESEL M., Insert and delete algorithms for maintaining dynamic Delaunay triangulations 1982 North-Holland

30 DEVIJVER P.A., DEKESEL M., Computing multidimensional Delaunay tessellations Philips Research Laboratory

31 On digital image processing and analysis OTAN Institut d etudes avancees Bonas France Juillet 1980

32 DOERFFER ROLAND AND FISCHER JURGEN, Concentration, distribution and variability of phytoplankton sediment and suspended matter in estuarine and coastal waters. Seventeenth International Symposium on remote sensing of environment. Ann Arbor May 1983 (Poster Session B)

33 YOSIO EDEMIR SHIMABUKURO, Vegetation survey in Amazonia using Landsat data Seventeenth International Symposium on remote sensing of environment. Ann Arbor May 1983 (Poster Session D)

34 FISCHLER M.A., ELSCHLAGER R.A., The representation and matching of pictorial structures pp:67-92 IEEE Trans on Computers Vol C22 NO 1 Jan 1973

35 FORREST R.B., Simulation of orbital image-sensor geometry Photogrammetric Engineering and remote sensing Vol 47 No 8, August 1981 pp. 1187-1193

36 FORSTER B., Urban control for landsat data Photogrammetric Engineering and remote sensing Vol 46 No 4, April 1980 pp. 539-545

37 FORTIN M., NIBLACK W., Multisource image registration Seventeenth International Symposium on remote sensing of environment. Ann Arbor May 1983 (Poster Session F)

38 FORTIN M., Recalage d'images multi-sources Congrès de Reconnaissance de Forme et d'Intelligence Artificielle, Paris, Janvier 1984,(à paraître)

39 FORTIN M., Multisource image registration International Journal of Remote Sensing (à paraître)

40 FRANCHI P., GONZALEZ J., MANTEY P., PAOLI C., PAROLO A., SIMMONS J., Design Issues and Architecture of Hacienda, an Experimental Image Processing System IBM Journal of Research and Developpement vol 27 no 2 March 1983

41 FRIEDMANN D.E., Operational resampling for correcting images to a geocoded format 15TH Int. Symp.on Rem. Sens. of Envir. May 81 Ann Arbor, MI

42 GAGALOWITZ A, Vers un modèle de texture Thèse d'Etat Université Pierre et Marie Curie Paris VI (Mai 1983)

43 GALLAGER R.H., Finite element Analysis Fundamentals Prentice Hall

44 GAMBIER G., Notions sur les representations planes de la terre IGN (1975)

45 GEORGE SMITH E., Computer aided design of a PLA implemted fast Walsh Hadamard transform device IBM Virginia IEEE (1980)

46 GREENBELT (MARYLAND) NASA, Control point location MSS data processing description Goddard Space Flight Center NASA (1978)

47 HADY M.A. ABDEL, Landsat digital data processing for estimation of agriculture land in Egypt. Seventeenth International Symposium on remote sensing of environment. Ann Arbor May 1983 (Poster Session C)

48 HUSSEIN A. YOUNES, Application of remote sensing techniques to detect desertification and its control in Saudi Arabia. Seventeenth International Symposium on remote sensing of environment. Ann Arbor May 1983 (Poster Session C)

49 ICHIKAWA T.,TAJIMA Y.,YAMAMURA M., Retrieval of image features in terms of content-addressing of hierarchically structured image data Proceedings of the workshop on Picture data description and management IEEE Computer Society August 27-28 1980

50 IBM SCIENTIFIC CENTER, Hips general information manual

51 JAIN ANIL K., Advances in mathematical models for image processing IEEE (1981)

52 JEANSOULIN R., DARCOS J.C., Extraction de contour par derivation après lissage et sur-échantillonnage fictif sur des images de télédétection (P. Sabatier Toulouse) (1979)

53 JEANSOULIN R., Le recalage automatique d'images. ENSEEIHT TOULOUSE (1979)

54 JEANSOULIN R., Extraction of true discontinuities on weak spatial redundancy images for their geometric correction Université Paul Sabatier ENSEEIHT Toulouse (1980)

55 JEANSOULIN R., Automatic multitemporal segmentation for diachronic analysis of remotely sensed images Université Paul Sabatier ENSEEIHT Toulouse (1981)

56 JEANSOULIN R., DARCOS J-C., RIGAL G., Field by field multitemporal analysis of aerial scanner data geometrically corrected by means of a sliding model(CNRS) 15TH Int. Symp. on Remote Sensing of Envir. May 81 Ann Arbor; MI

57 JEANSOULIN R., Automated image to image registration: a way to multi-temporal analysis of remotely sensed data Digital Image Processing: pp 561-577 J.C. Simon, R.M. Haralick.

58 JEANSOULIN R., Les images multisources en télédétection: Mise en correspondance numérique et analyse de la structure géométrique. CNES TOULOUSE

59 JPL PUBLICATION, Application of multispectral RADAR and LANDSAT imagery to geologic mapping in death valley. NASA (1978)

60 KAHLE A.B., A simple thermal model of the earth's surface for geologic mapping by remote sensing. Journal of geophysical research (April 1977)

61 KANADA T., Region segmentation : Signal vs. Semantics On digital image processing and analysis OTAN Institut d etudes avancees Bonas France Juillet 1980

62 KIDELAN M., MORENO V., VALVERDE A., Geometric correction of airborne multispectral scanner images 15th Int. Symposium on Remote Sensing of Environment 11-15 MAY 1981 Ann Arbor , MI

63 KIRKPATRICK D.G., A note on Delaunay and optimal triangularisation Information Processing Letters Vol 10 No 3 April 1980 pp: 127-128

64 KIYOSHI TSUCHIYA, A study on local natural environments by multi-observations Seventeenth International Symposium on remote sensing of environment. Ann Arbor May 1983 (Poster Session C)

65 LEFEBVRE D., DAVID M ., Dynamic clustering and strong patterns recognition: new tools in automatic classification. Ecole Polytechnique - Montreal (1977)

66 LEVIALDI S., Finding the edge Istituto di Cybernetica CNR Naples NATO (1979)

67 MARSHA JO HANNAH, Error detection and correction in digital terrain models. Photogrametric Engineering and Remote Sensing Vol 47 No 1 Jan81 PP: 63-69

68 JOHN A. MEROLA Detection of aspen/conifer forest mixes from multitemporal Landsat digital data. Seventeenth International Symposium on remote sensing of environment. Ann Arbor May 1983 (Poster Session D)

69 DE MASSON D AUTUME, Le traitement géométrique des images de télédétection. IGN (1979)

70 NACK M.N., Rectification and registration of digital images and the effect of cloud detection. Computer Sciences Corporation Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium 1977 PP: 12-23

71 NELSON R., GREBOWSKY G., Evaluation of temporal registration of Landsat scenes Int. Journal of Remote sensing Vol 3 No 1 1982 pp: 45-50

72 NGUYEN P.T., An exploitation of registered data of SIR-A, SEASAT and LANDSAT. Proceedings of the International Symposium on Remote sensing for Exploration Geology. Dallas (U.S.A.) DEC 1982

73 NGUYEN P. T., La simulation de Spot: une étude en milieu urbain. Centre scientifique IBM-France. (1983)

74 NIBLACK W., The control points library building system. IBM Centre Scientifique Paris France Photo. Engin. and Rem. Sens. Vol 47 No 12 Dec 81 pp: 1709-1715

75 NIBLACK W., IBM 7350 image processing system, a tool for earth resources data processing. IBM scientific center Paris France Eighth International Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data with Special emphasis on Crop Inventory and Monitoring. Purdue University West Lafayette, Indiana 47907 USA (july 7-9, 1982)

76 ORTI F., Optimal distribution of control points to minimize Landsat image registration errors Photo. Engin. and Rem. Sens. Vol 47 No 1 Jan81 pp: 101-110

77 ORTI F.,REBELLO M.,MARTINEZ DE ARAGON A., Digital registration of satellite imagery and its application to cartography IBM Journal of research and dvl.

78 PRICE J.C., On the use of satellite data to infer surface fluxes at meteorological scales. Journal of remote sensing (August 1982)

79 RADIG B., Hierarchical symbolic description and matching of time varying images IJCPR Munich 1982 pp: 1007-1010

80 RAUNET M., OUDIN M.F., ROGALA J.P., SAVARY G., Application of satellite remote sensing to soil mapping in White Volta Valley (Upper Volta) Symposium de l'Association Internationale de la Science du sol Varsaw Poland June 1981.

81 RASOOL I., COUREL M.F., KANDEL R., Satellite investigation of surface cover changes in Sahel during the last decade. XXIV Plenary Meeting of COSPAR and the V General Assembly of Scope. Ottawa (Canada) May-June 1982.

82 ROCKWOOD A.A. AND COX S.K., Satellite inferred surface albedo over Northwestern Africa Journal of remote sensing (March 1978)

83 ROGALA J. P., Approche numérique de l'espace agricole: Analyse de l'hétérogénéité et de la structure des unités cartographiques. Thèse de Docteur Ingénieur en géologie appliquée. Institut National Agronomique Paris-Grignon (Janvier 1982)

84 SLATER PH., Remote Sensing: optics and optical systems. Addison-Wesley Publishing Company Advanced Book Program 1980

85 SOER G.J.R., Estimation of regional evapotranspiration and soil moisture conditions using remotely sensed crop surface temperatures. Journal of remote sensing of environment (Sept 1980)

86 SPANNER MICHAEL A., Thematic mapper simulator research for forest ressource mapping in the Clearwater National Forest, Idaho. Seventeenth International Symposium on remote sensing of environment. Ann Arbor May 1983 (Poster Session F)

87 STEVENSON MERRITT R., A synoptic approach to studying changes in sea surface temperature using géostaionary satellite data. Seventeenth International Symposium on remote sensing of environment. Ann Arbor May 1983 (Poster Session B)

88 STEWART H. E., BLOM R., ABRAMS M., DAILY M., Rock type discrimination and structural analysis with Landsat and Seasat data: San raphael Swell, Utah JPL California

89 STOCKMAN G., KOPSTEIN ST., BENETT S., Matching images to models for registration and object detection via clustering P.A.M.I. Vol 4 No 3 May 1982 pp: 229-241

90 TANIMOTO ST.L., Hierarchical picture indexing and description Proceedings of the workshop on Picture data description and management IEEE Computer Society August 27-28 1980

91 THIESSE B., Repérage de motifs sur images numériques, Application à la lecture optique et à la correction géométrique en télédétection(P. Sabatier Toulouse) (1980)

92 THOMAS I.L, Textural enhancement of a circular geological feature. Photogrametric Engineering and Remote Sensing Vol 47 No 1 Jan81 pp: 89-91

93 TOBLER W.R., Comparing figures by regression Computer Graphics 12, no. 3, August 1978 pp: 193-195

94 TOUSSAINT G.T., Pattern recognition and geometrical complexity 5th Intern. Conf. on pattern recognition Miami 1980 pp: 1324-1347

95 TSUCHIYA K., ARAI K., Studies of the gcp selection process and its accuracy Processing of the second Australasian Remote Sensing Conf. (1981 Canberra)

96 TUCERYAN M., AHUJA N., Segmentation of dot patterns containing homogeneous clusters IJCPR Munich 1982 pp: 392-394

97 WANG CHENG YE AND LI XIA, A comparative study of classification algorithms for forest land cover imagery. Seventeenth International Symposium on remote sensing of environment. Ann Arbor May 1983 (Poster Session C)

98 WATANABE S., SAWADA N., An analytic correction method for satellite MSS geometric distorsion Photogrammetric Engineering and remote sensing Vol 47 No 8, August 1981 pp: 1195-1203

99 ZUCKER S.W., Cooperation and visual information processing Proceedings of the workshop on Picture data description and management IEEE Computer Society August 27-28 1980

Compagnie IBM France

Réalisé sur les presses de l'Imprimerie d'Entreprise
Usine de BOIGNY – FRANCE

5026–12–1983